



Frederico da Silva Nogueira

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Aplicação de Técnicas de Controlo de Condição no Âmbito da Conservação do Património Industrial

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva,
Professor Auxiliar,
Faculdade Ciências e Tecnologias,
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor António Paulo Vale Urgueira
Professor Associado,
Faculdade Ciências e Tecnologias,
Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutora Maria Isabel Leandro Pinheiro de
Almeida Tissot Daguette
Investigadora Auxiliar,
Faculdade Ciências e Tecnologias,
Universidade Nova de Lisboa / LIBPhys-UNL
Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva
Professor Auxiliar,
Faculdade Ciências e Tecnologias,
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2020

Aplicação de Técnicas de Controlo de Condição no Âmbito da Conservação do Património Industrial

Copyright © Frederico da Silva Nogueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicado à pessoa que estará sempre presente...

Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem a colaboração e apoio de várias pessoas às quais gostaria de deixar o meu mais sincero agradecimento:

Ao meu orientador, o professor Tiago Silva, pela presença, o interesse, a orientação, a dedicação e as sugestões ao longo de todas as etapas da elaboração deste trabalho.

A todos os participantes e envolvidos no projeto IH4Future do LIBPhys-UNL, em especial às investigadoras Isabel Tissot, Marta Manso e Graça Filipe, pela constante disponibilidade, apoio, tempo dispensado e esclarecimentos.

Ao Senhor Francisco Moura pela disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos e pela companhia e conversa sempre bem-disposta.

Ao meu colega Gonçalo Santos pela companhia, pela ajuda, pela motivação e pela constante disponibilidade.

Um grande obrigado à minha família, pai, irmã, avós, tios e primas, aos amigos e aos meus salgadinhos pelo apoio incondicional que sempre mostraram e por me terem motivado sempre a continuar a trabalhar para alcançar os objetivos. Um especial obrigado à senhora engenheira Anabela Maia pela ajuda, apoio, orientação e pela insistência em não desistir quando as coisas se mostraram mais complicadas.

Poderia nomear individualmente cada pessoa, mas prefiro continuar a partilhar a vida com aqueles que a querem partilhar comigo.

Um obrigado a todos.

A Primeira Revolução Industrial iniciada no século XVIII é considerada atualmente como um dos grandes marcos da história moderna. Deste período subsistem até aos dias de hoje diversas máquinas que representam a memória dessa era e que têm vindo a suscitar a atenção de áreas como a de conservação e restauro. No entanto, a conservação deste tipo máquinas, especialmente as que ainda funcionam, requer uma atenção mais especializada, sendo neste contexto que as áreas da engenharia mecânica podem prestar um serviço fundamental. Aplicando técnicas modernas e conhecimentos aprofundados sobre o funcionamento dos mecanismos mais antigos, é possível fazer uma caracterização do comportamento dinâmico, uma determinação de propriedades mecânicas e uma análise mais rigorosa do estado de condição desses equipamentos.

É neste sentido que surge o tema desta dissertação de mestrado. Tendo por base uma proposta do projeto *IH4Future do LIBPhys* – UNL (Departamento de Física da FCT), e da Câmara Municipal do Seixal, foi realizado um estudo em torno de um conjunto de objetos existente na Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços, constituído por uma máquina a vapor, com mais de um século, e as tubagens, caldeiras e bombas de água que fazem parte do seu funcionamento. O estudo realizado assenta numa caracterização do funcionamento deste conjunto, através da aplicação de técnicas de manutenção preventiva, como a análise de vibrações e de temperaturas (termografia e medição com sensores).

Com um interesse essencialmente histórico e cultural, a recuperação desta máquina a vapor e a possibilidade de a manter em condição operacional, na instalação industrial onde foi originalmente implantada, visa a preservação do património industrial, abrindo eventualmente um caminho à conservação e entendimento destes objetos históricos, assente na comunhão entre os conhecimentos provenientes das áreas de conservação, restauro e materiais e os conhecimentos e técnicas da área de engenharia mecânica.

O presente estudo apresenta o trabalho desenvolvido para a recolha, processamento e análise dos dados sobre vibrações e temperatura medidos *in situ*, com a máquina em funcionamento, assim como os resultados obtidos e algumas considerações conclusivas, podendo esta avaliação inicial constituir uma situação de referência para os trabalhos futuros a desenvolver.

Palavras-chave: Conservação Património Industrial; Análise de Dinâmica; Controlo de Condição.

Abstract

The industrial revolution initiated in the 18th century is considered to be one of the greatest landmarks of modern history. From that period, several ancient machines that represent the memory of that era subsist until the present days and have been attracting the attention of areas such as conservation and restoration. However, the preservation of this type of machines, especially those that are intended to maintain operational, requires a more specialized attention justifying the fundamental collaboration of areas like mechanical engineering. Applying modern techniques and in-depth knowledge about the functioning of ancient mechanisms, it is possible to characterize the dynamic behavior, determine mechanical properties and more rigorously analyze the condition of these equipments.

Thus, arises the theme of this master's thesis. Based on a proposal of the IH4Future project by LIBPhys - UNL (FCT Physics Department), and by the Seixal City Council, a study was carried out around a set of objects existing in the Vale de Milhaços gunpowder plant, consisting of a steam engine, more than a century old, and the pipes, boilers and water pumps that are part of its operation. The study carried out is based on a characterization of the operation of this set, through the application of predictive maintenance techniques, such as the analysis of vibrations and temperatures (thermography and measurement with sensors).

From an historical and cultural interest point of view, the restoration of this steam engine and the possibility of maintaining it in an acceptable operating condition, in the location where it was originally installed, aims the preservation of the industrial patrimony, eventually creating a path for the conservation and understanding of these historical objects, based on the knowledge communion of Conservation, Restoration, Materials and the Mechanics fields.

This study presents the work developed for acquisition, processing and analysis of vibrations and temperature data, obtained from the steam machine in operating conditions (study object), as well as the obtained results and some conclusive considerations. This initial assessment may constitute a reference situation for future work.

Keywords: Conservation of Industrial Heritage; Dynamics Analysis; Condition Control.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Quadros	xii
1. Introdução.....	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 A Manutenção de Máquinas	1
1.3 A Monitorização de Condição	5
1.4 Objetivos	7
1.5 Estrutura da Dissertação	7
2. A Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços.....	9
2.1 Breve Contextualização Histórica.....	9
2.2 Características e Funcionamento da Máquina a Vapor.....	11
2.3 Caldeiras.....	15
2.4 Sistema de Refrigeração.....	17
2.5 Manutenção do Sistema de Geração de Energia.....	18
3. Métodos e Equipamentos.....	21
3.1 Análise Vibracional	21
3.1.1 Fundamentos Teóricos	21
3.1.2 Estado da Arte	25
3.1.2.1 Aquisição e Processamento de Sinais Vibratórios	27
3.1.2.2 Análise e Interpretação de Sinais Vibratórios	30
3.1.3 Equipamento Utilizado.....	38
3.1.4 Procedimento para Medição de Vibrações.....	40
3.2 Termografia	43
3.2.1 Fundamentos Teóricos	43
3.2.2 Estado da Arte	47
3.2.3 Equipamento Utilizado.....	49
3.2.4 Procedimento para Recolha de Dados de Termografia.....	50
3.3 Monitorização da Temperatura da Caldeira	51
3.3.1 Fundamentos Teóricos	51
3.3.2 Equipamento Utilizado.....	52
3.3.2.1 Montagem do sistema de medição e aquisição de dados.....	54
3.3.3 Procedimento para Medição de Temperatura	58
4. Monitorização de Condição na FPVM.....	59
4.1 Análise e Interpretação dos Sinais Vibratórios.....	59
4.2 Análise e Interpretação das Imagens Termográficas	80
4.3 Análise e Interpretação do Registo de Temperatura.....	91
5. Conclusões.....	92

5.1 Trabalhos futuros	95
ANEXO 1	103
ANEXO 2	106

Índice de Figuras

Figura 1 – Evolução da manutenção. Adaptado de (Brito, M., 2003).....	2
Figura 2 - Abrangência da Manutenção (Brito, M., 2003)	3
Figura 3 – Tipos e abordagens de Manutenção. Adaptado de (Morgado, 2019).....	4
Figura 4 - Edifício central, o “coração da fábrica” (cm-seixal.pt).....	10
Figura 5 - Máquina a Vapor e Volante de Inércia (cm-seixal.pt)	12
Figura 6 - Sistema de Válvulas da Máquina a Vapor	13
Figura 7 - Esquema de funcionamento simplificado (Arias, 2017).....	14
Figura 8 - Volante de Inércia	14
Figura 9 - Bomba de Alimentação Independente "Burrinho"	16
Figura 10 - Aspeto das Caldeiras (cm-seixal.pt).....	17
Figura 11 - Tanque de refrigeração.....	18
Figura 12 – A abordagem da análise de vibrações (Wowk, 2020)	22
Figura 13 – Propagação de uma onda	24
Figura 14 - Registo de vibrações, com máquina em funcionamento (a) e sem máquina (b)	26
Figura 15 – Fluxograma da aquisição e processamento de sinal vibratório	27
Figura 16 – Fenómeno de <i>Aliasing</i>	29
Figura 17 – Transformação de espectro no domínio do tempo para domínio da frequência, através da FFT (Scheffer, et al., 2004)	30
Figura 18 – Tipo de vibrações produzidas devido a empeno do veio (Girdhar, et al., 2004)	32
Figura 19 – Tipo de vibrações produzidas devido a desequilíbrio (Girdhar, et al., 2004)	33
Figura 20 – Tipo de vibrações produzidas devido a cavitação (Girdhar, et al., 2004) ...	34
Figura 21 – Constituição de um rolamento.....	35
Figura 22 – Espectro FFT da degradação de rolamentos	36
Figura 23- Espectro de frequências de folgas em rolamentos de escorregamento (Girdhar, et al., 2004)	36

Figura 24 - Fenómeno de <i>Oil Whirl</i> (Girdhar, et al., 2004).....	37
Figura 25 - Algoritmo utilizado para aplicação da FFT	40
Figura 26 - Espetro Eletromagnético (fonte: https://static.docsity.com)	44
Figura 27 - Relação entre energia e comprimento de onda	45
Figura 28 - Casa das Caldeiras (Bocanegra, 2017).....	47
Figura 29 - Elementos presentes na área existente por cima da caldeira (Bocanegra, 2017)	47
Figura 30 - Estátua " <i>Madonna with the Child</i> " (Campione, et al., 2020).....	48
Figura 31 - Termogramas obtidos de várias posições (Campione, et al., 2020).....	48
Figura 32 - Representação do Funcionamento da Câmara	49
Figura 33 - Esquema dos projetos de monitorização da temperatura	54
Figura 34 – Esquema de montagem do circuito (Fonte: www.circuitmagic.com/wp-content/uploads/2018/07/MAX6675-module-with-Arduino.jpg).....	55
Figura 35 - Código para obtenção de dados do Sensor.....	55
Figura 36 - PLX-DAQ	56
Figura 37 - Esquema de montagem do sensor ao módulo WiFi	57
Figura 38 – Código para programação do sensor	58
Figura 39 - Visualização dos dados	58
Figura 40 – Volante de Inércia e Pormenor da Chumaceira (cm-seixal.pt)	59
Figura 41 – Espetro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 3 (Chumaceira do Volante de Inércia).....	60
Figura 42 – Espetro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 3 (ampliação do apresentado na Figura 41).....	61
Figura 43 – Espetro de frequências do Registo 2 do acelerómetro 3 (ampliação)	62
Figura 44 – Espetro de frequências do Registo 3 do acelerómetro 3 (ampliação)	62
Figura 45 – Espetro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 3 (harmónica de 0,85 Hz)	63
Figura 46 – Sistema de transmissão por correias.....	64
Figura 47 – Volante e polias	64

Figura 48 – Polias (4), (5) e eixo rotativo da bomba (6)	65
Figura 49 –Localização dos acelerómetros na bomba de alimentação principal.....	66
Figura 50 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (Corpo da bomba)	67
Figura 51 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (ampliação)	67
Figura 52 – Espectro frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (harmónicas 14 Hz)	68
Figura 53 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 2 (harmónicas 14 Hz)	69
Figura 54 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 3 (harmónicas 14 Hz)	69
Figura 55 – Espectro de frequências do sinal do acelerómetro 1 (eventual fenómeno de cavitação)	70
Figura 56 – Espectro frequências registo 2 do acelerómetro 1 (eventual fenómeno de cavitação)	71
Figura 57 – Espectro de frequências do Registo 2 do acelerómetro 2 (Rolamentos escorregamento).....	72
Figura 58 – Espectro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 2 (Rolamentos escorregamento).....	72
Figura 59 – Modelação corpo da máquina efetuada por (Santos, 2020.)	73
Figura 60 – Representação esquemática do interior de uma máquina vapor (Filipe, et al., 2012)	73
Figura 61 - Espectro de frequências do registo 1 do acelerómetro 2 (Harmónicas de 0,86 Hz)	75
Figura 62 - Espectro de frequências do registo 3 do acelerómetro 2 (Harmónicas de 1 Hz)	76
Figura 63 - Espectro de frequências do registo 1 do acelerómetro 1 (Veio excêntrico) ..	77
Figura 64 - Espectro de frequências do registo 3 do acelerómetro 1 (Veio excêntrico) ..	78
Figura 65 - Espectro de frequências do acelerómetro 1 no Registo 2 (Veio excêntrico) .	78
Figura 66 - a) Imagem real da máquina b) Imagem térmica da máquina	80

Figura 67 – a) Imagem real da máquina b) Pormenor das temperaturas de vários componentes	81
Figura 68 – a) Imagem real da zona do veio do pistão b) Imagem termográfica da zona do veio do pistão	81
Figura 69 – Corpo da máquina (do lado do operador).....	82
Figura 70 – Pormenor das temperaturas do sistema de válvulas a) perspetiva frontal b) perspetiva lateral	83
Figura 71 – Tubagem de Saída de Vapor -Vapor utilizado no avanço do pistão	84
Figura 72 – Saída de Vapor - Vapor utilizado no retorno do pistão	84
Figura 73 - Excerto de tabela de termodinâmica com as propriedades da água	85
Figura 74 – Junção de tubagens	86
Figura 75 – Zona de união de tubagem a) Imagem termográfica b) Imagem real	87
Figura 76 – Zona de abrasão localizada a) Imagem termográfica b) Imagem real	87
Figura 77 – Zona de união de tubagem com selante.....	88
Figura 78 – Zona de união de tubagem com selante – imagem real.....	88
Figura 79 - Imagem real da caldeira	89
Figura 80 – Imagem termográfica da caldeira	89
Figura 81 – Fratura na porta da Caldeira	90
Figura 82 – Evolução da temperatura à entrada da fornalha	91

Índice de Quadros

Quadro 1 – Tipos de manutenção de acordo com a NP EN 13306:2017	4
Quadro 2 – Outras classificações dos motores a vapor	12
Quadro 3 – Conceitos básicos da análise de vibrações.....	24
Quadro 4 – Conceitos importantes no processamento de sinais vibratórios.....	29
Quadro 5 – Tipos de desalinhamentos e tipo de vibrações produzidas (Brady, 2002; Girdhar, et al., 2004).....	32
Quadro 6 – Tipo de folgas mecânicas e tipo de vibrações produzidas (Girdhar, et al., 2004).....	34
Quadro 7 – Frequências emitidas por um rolamento defeituoso (Roque, et al., 2007): .	35
Quadro 8 – Especificações técnicas dos acelerómetros B&K	38
Quadro 9 – Especificações técnicas da placa de aquisição de dados – Prosig P8012	39
Quadro 10 - Colocação dos Acelerómetros	42
Quadro 11 – Leis da física que regem a transferência de energia por radiação	45
Quadro 12 – Especificações técnicas da câmara de infravermelhos	49
Quadro 13 – Lista do equipamento utilizado.....	52
Quadro 14 – Sensor MAX6675 K-Type Thermocouple Module	52
Quadro 15 – Módulo WiFi ESP8266 (Fonte: PTRobotics.com)	52
Quadro 16 – Placa Arduino Uno R3	53
Quadro 17 – Registo de parâmetros de temperatura.....	80
Quadro 18 – Registo dos parâmetros de temperatura	83
Quadro 19 – Síntese de aspetos a considerar em trabalhos futuros	97

1. Introdução

1.1 Contexto e Motivação

O contexto deste projeto pode ser resumido de uma forma muito simples: realizar um estudo da máquina a vapor e todo o sistema responsável pelo seu funcionamento, presente na Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços (FPVM), recorrendo a técnicas modernas de deteção de falhas, com o objetivo de abrir caminho para a realização de uma manutenção baseada na análise de resultados experimentais.

Se apenas o aspeto inovador do projeto justifica a motivação de o levar em frente, também a dimensão social e cultural que tem associada, visando permitir o acesso a mais pessoas prolongando o seu funcionamento em boas condições, reforça a confiança quanto à necessidade e importância deste projeto.

1.2 A Manutenção de Máquinas

Para o desenvolvimento deste trabalho importa conhecer o contexto de manutenção em que o objeto de estudo se enquadra, pois, tratando-se de um sistema do início do século passado, muito há a referir quanto à evolução do conceito de manutenção desde essa época até aos dias de hoje. Com a sofisticação da indústria, o aumento de competitividade das empresas, a exigência de produção e até dos consumidores, a manutenção atingiu de facto nos tempos atuais um novo patamar de intervenção.

De uma época onde a abordagem era essencialmente reativa, baseada na correção/reparação de falhas, para uma abordagem que se pretende cada vez mais preditiva no sentido da minimização de custos (económicos, ambientais e sociais) e da otimização da vida útil dos equipamentos, existe algum trabalho a desenvolver quando se pretende aplicar este tipo de abordagem a equipamentos antigos, sem qualquer registo do seu padrão de funcionamento, e cuja atividade interessa ao mundo preservar pelo seu valor histórico e cultural.

O conceito de manutenção define-se como sendo todas as ações técnicas, administrativas e de gestão que se aplicam num determinado equipamento com o objetivo de o manter numa condição aceitável para o desempenho da sua função. Esta ideia surgiu associada ao facto de todos os equipamentos que se encontram em funcionamento estarem sujeitos a processos de deterioração.

A manutenção, reputada de tarefa secundária e dispendiosa, alvo de reduções fortes em tempos de crise ou em situações económicas difíceis, passou, então, pelos custos das suas intervenções, a ser considerada fator determinante na economia das empresas, capaz de alterar radicalmente os índices de produtividade, a livre concorrência e o aumento de produção por empregado (Brito, M., 2003).

A manutenção tem sofrido grande evolução associada principalmente ao grande crescimento da indústria, com o aumento não só do número de fábricas, mas também da sofisticação dos equipamentos industriais. Este crescimento levou ao surgimento de novas técnicas e métodos de manutenção e à gestão de projetos.

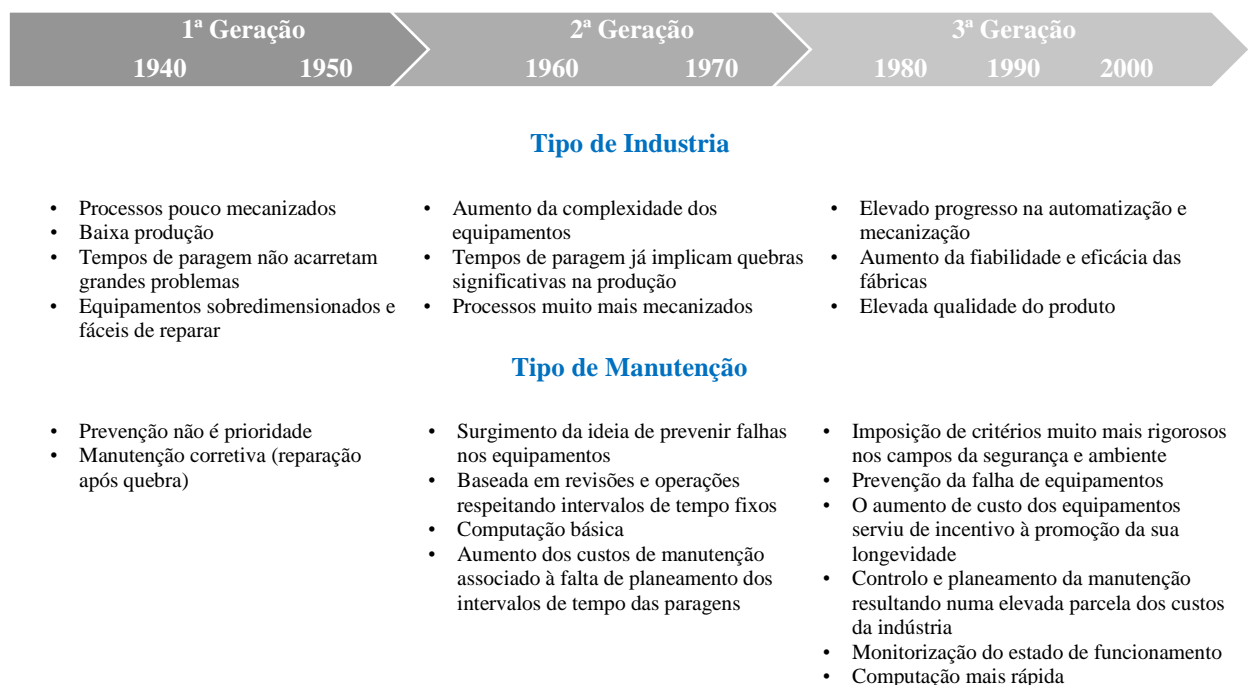


Figura 1 – Evolução da manutenção. Adaptado de (Brito, M., 2003).

A Figura 1, resume de uma forma simplista, o que foi, não só a evolução da indústria ao longo dos anos, mas também do tipo de manutenção que foi acompanhando esta evolução. A primeira geração é caracterizada por uma baixa produção, diretamente relacionada com a pouca mecanização dos processos. O conceito de manutenção era elementar e baseava-se apenas na reparação após a quebra. Na segunda geração já se assiste a um aumento da complexidade dos equipamentos. A evolução da mecanização dos processos levou a um aumento da produção, o que proporcionou também o aumento do custo por cada quebra de produção devido a falhas. É exatamente este aumento de

custo que leva à necessidade de tentar prevenir as falhas nos equipamentos. A terceira geração de manutenção trouxe não só novas técnicas e métodos, tais como a monitorização de condição, mas também novas ferramentas de apoio à decisão, como as normas ou os estudos dos modos de falha.

A evolução da indústria despertou o interesse crescente para a vertente da manutenção havendo a necessidade de, não só melhorar o entendimento que havia das máquinas, mas também de correlacionar esse conhecimento com a possibilidade de ocorrência de falhas e com a vida útil de um equipamento.

Mais recentemente surgiu uma nova geração de manutenção, a manutenção baseada no risco, comumente designada RBM (da terminologia inglesa, *Risk Based Maintenance*), segundo a qual o planeamento da manutenção se baseia na avaliação de risco do processo produtivo, com o objetivo identificar previamente as operações ou áreas do processo com maior probabilidade, ou gravidade, de ocorrência de falhas, permitindo uma atuação preventiva que minimize a necessidade de paragens no processo e os prejuízos daí decorrentes. Além do tradicional impacto em questões tradicionais como os resultados económicos, a fiabilidade, a eficácia ou a otimização dos processos industriais, a manutenção assumiu ainda outras preocupações como a gestão energética, a conservação ambiental e a valorização das pessoas que trabalham com os sistemas (Figura 2).

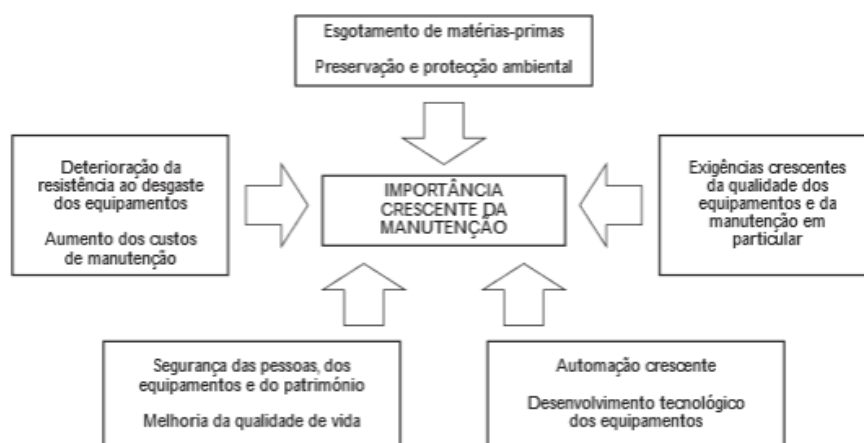


Figura 2 - Abrangência da Manutenção (Brito, M., 2003)

Face à evolução significativa do conceito de manutenção a nível global e das suas várias vertentes e abordagens, surgiu a necessidade de uniformização visando o estabelecimento de uma terminologia comum, passível de ser utilizada por todas as partes interessadas. Neste sentido surgiu em 2001, a norma europeia EN 13306 dedicada a *Maintenance terminology* (CEN, 2017). Esta norma foi adaptada, surgindo então a versão portuguesa, NP EN 13306:2017. Apresentam-se na Figura 3, de forma esquemática, os vários tipos e abordagens de manutenção, tendo por base esta norma europeia e no Quadro 1, uma breve descrição de cada um deles.

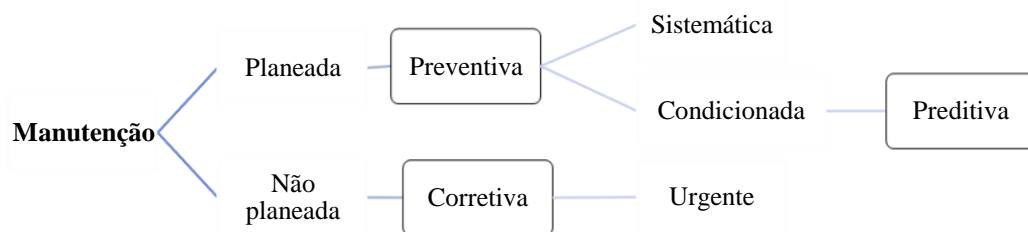


Figura 3 – Tipos e abordagens de Manutenção. Adaptado de (Morgado, 2019)

Quadro 1 – Tipos de manutenção de acordo com a NP EN 13306:2017

Manutenção Corretiva	<i>A manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida</i>		Considera-se avaria qualquer alteração que incapacite o sistema de realizar a função destinada. Apresenta desvantagens tais como a necessidade de manter materiais em stock para uma intervenção rápida, que acarreta custos, ou a quebra de produção durante a intervenção, mas também apresenta a vantagem de não incluir custos de controlo de condição. Este tipo de manutenção aplica-se em equipamentos que possuam pouca importância no processo geral e em que o custo de paragem é baixo.
Manutenção Preventiva	<i>Manutenção efetuada a intervalos de tempo predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, para reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem</i>		
	Sistemática	<i>Efetuada a intervalos de tempo preestabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem</i>	Baseia-se em intervenções periódicas predeterminadas ou de acordo com critérios estabelecidos, para reduzir a probabilidade de avaria. Estas intervenções podem ser programadas tendo em conta as recomendações dos fabricantes; experiência dos técnicos ou histórico de avarias do equipamento. Trata-se de um tipo de manutenção bastante utilizada no controlo dos óleos e filtros dos equipamentos. Trata-se de uma abordagem vantajosa em equipamentos que não se encontrem permanentemente em atividade, onde existam técnicos qualificados e tempo para a realização dos trabalhos. A desvantagem desta metodologia passa pela possibilidade da realização da intervenção demasiado cedo ou tarde. Isto leva por exemplo a substituição de componentes que não necessitavam de reparação, implicando a quebra desnecessária de produção e o desaproveitamento da vida útil dos componentes.
	Condicionada -Manutenção Preditiva	<i>Baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes</i>	Estes parâmetros caracterizam o funcionamento da unidade, comparando os resultados com valores padrão. As intervenções de manutenção são programadas atempadamente assim que se detetam falhas em alguma parte do equipamento em análise. Desta forma, os custos de manutenção de stock e os custos de indisponibilidade serão reduzidos, pois a aquisição de peças será feita consoante a necessidade, reduzindo o stock necessário (custos de manutenção) e as intervenções são programadas evitando assim paragens desnecessárias da linha de produção (custos de indisponibilidade) (Marcorin, et al., 2003). As desvantagens deste método residem no tempo exigido e nas verbas necessárias para as operações de monitorização e manutenção, especialmente se for feita uma avaliação incorreta do estado do equipamento

A manutenção tradicionalmente realizada, é efetuada com base em intervalos de tempo predeterminados ou num número definido de utilizações, enquadrando-se na chamada manutenção preventiva; ou então, sempre que ocorre uma avaria ou falha, designando-se nesse caso de manutenção corretiva (não programada), a qual exige ações imediatas, com paragens que podem ser longas.

Com a manutenção preditiva, baseada na monitorização da condição do equipamento ao longo do tempo, é possível obter um aviso prévio de um problema iminente, permitindo que as reparações sejam efetuadas apenas quando são necessárias e sejam planeadas por forma a evitar grandes interrupções (Lacey, 2010; CEN, 2017).

1.3 A Monitorização de Condição

A manutenção baseada na monitorização de condição, envolvendo a análise de tendência do desempenho dos equipamentos e dos seus parâmetros operacionais, visa detetar problemas ainda em desenvolvimento, ou seja, antes que possam ocorrer falhas e danos graves, sendo que a deteção e diagnóstico de problemas *on-line* é obviamente a forma mais desejável de manutenção dos equipamentos.

Quando os problemas são detetados precocemente e a natureza do problema pode ser identificada enquanto o equipamento ainda está a funcionar, obtêm-se os seguintes benefícios, com repercussões diretas nos custos de manutenção (Shreve, 2003):

- programação das paragens para momentos mais convenientes
- preparação prévia do trabalho (contratação de peritos, aquisição de ferramentas e componentes a substituir), minimizando os tempos de paragem;
- possibilidade de evitar os danos extensivos de uma falha forçada
- evitadas as abordagens dispendiosas de tentativa e erro para resolução dos problemas, uma vez que a análise identifica a natureza do problema
- aumento da vida útil dos equipamentos que se mantêm em boa condição de funcionamento.

A caracterização da condição de funcionamento de um equipamento é o ponto de partida, para um tipo de manutenção programada, preditiva, que permite como já referido minimizar não só o custo de paragens não previstas e indesejadas, mas também o custo de intervenções desnecessárias (Morengi, 2005). Destaca-se, portanto, a importância da caracterização da condição de funcionamento do equipamento como ponto de partida para a realização de manutenção preditiva. Será este o ponto de partida para o caso de estudo da FPVM, procurar caracterizar ao máximo o funcionamento da máquina a vapor e de todos os sistemas envolvidos.

A manutenção baseada na condição, assume que o equipamento tem indicadores que podem ser monitorizados e analisados para determinar a necessidade de intervenção. Esta monitorização pode ser contínua utilizando instrumentação digital permanente, ou em intervalos de tempo determinados, para monitorizar, diagnosticar ou avaliar a tendência da condição funcional do equipamento. Os resultados desta atividade permitem a avaliação da capacidade atual e futura do equipamento monitorizado e a determinação da natureza e programação da manutenção requerida (IAEA, 2007).

Existe uma variedade de tecnologias que pode ser usada para este efeito, contudo uma vez que as máquinas e sistemas mecânicos constituem a maior parte dos equipamentos industriais, a monitorização de vibrações é geralmente a principal componente deste tipo de programa de manutenção. É, contudo, vantajoso incluir outros parâmetros de monitorização além da condição mecânica, por poderem também ser críticos, pelo que devem incluir-se outras técnicas de diagnóstico (IAEA, 2007).

Para efetuar a caracterização/monitorização de condição de equipamentos existem atualmente várias técnicas que podem ser usadas, das quais se destacam as seguintes (Girdhar, et al., 2004):

Inspeção visual – Detecção de falhas a “olho nu”. É tipicamente a primeira inspeção realizada, dada a sua simplicidade. Permite muitas vezes detetar problemas que outras técnicas não conseguem mostrar. No entanto esta técnica não é prática para aplicação em larga escala, por ser morosa e não permitir aceder a certos sítios.

Análise de Vibrações – Permite detetar e identificar problemas como desalinhamentos, desequilíbrios, folgas, entre outras. Este tipo de análise consiste numa medição do nível de vibrações de qualquer equipamento e uma comparação com resultados padrão ou conhecimento técnico para avaliação.

Análise de óleos e lubrificantes – Recolha e avaliação dos óleos de lubrificação com o intuito de detetar partículas microscópicas que podem indicar deterioração interna do equipamento. Permite estudar o atrito, o desgaste e a lubrificação de superfícies sólidas em contacto.

Medições por ultrassons – Baseia-se na emissão de sons de elevada frequência (muito acima do limite audível) na superfície em avaliação. O som provoca a vibração mecânica do material do equipamento. A existência de vazios no material (fissuras, porosidade, entre outros) provoca a distorção dos sinais recebidos, dado que a velocidade do som através do ar existente nesses vazios é menor.

Termografia – Técnica que recorre a equipamentos de medição capazes de detetar e controlar a emissão de radiação infravermelha, que se relaciona com a temperatura do

equipamento, com o intuito de detetar anomalias térmicas (zonas mais quentes ou mais frias que o padrão normalizado) e identificar possíveis problemas.

Análises de parâmetros de rendimento – Detecção de possíveis problemas presentes no equipamento através da avaliação dos seus parâmetros de desempenho.

Análise da Corrente elétrica – Detecção de alteração de fluxos de corrente que podem indicar problemas no equipamento.

Atualmente é muito utilizado o conceito de monitorização de temperatura, não só recorrendo à termografia, mas também através da colocação de sensores que permitem acompanhar as variações de temperaturas pontualmente ou em contínuo. Este conceito é muito valorizado pela indústria, especialmente pelo facto de a temperatura ser um fator de risco não só para a integridade da máquina, mas também para a segurança dos operadores. É nesse intuito que o projeto procurou abordar também este conceito, procurando iniciar um padrão de acompanhamento das temperaturas dos vários componentes relacionados com a máquina a vapor.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho assenta em duas vertentes essenciais. A primeira, e talvez a mais relevante ao nível da dimensão de trabalho, passa por uma análise do estado de condição da máquina a vapor e de componentes como as bombas de água presentes na FPVM utilizando duas técnicas muito comuns na área de manutenção industrial, a análise de vibrações e a termografia. Apesar do nível embrionário, este projeto pretende, numa fase inicial, efetuar a caracterização do funcionamento da máquina, para que, posteriormente, a monitorização regular do seu funcionamento e dos seus componentes permita uma atuação proativa face à previsão de ocorrência de falhas e dessa forma ao prolongamento da vida funcional deste objeto histórico. A segunda vertente deste trabalho consiste no projeto de um sistema de aquisição de dados que permita a monitorização da temperatura da caldeira que fornece o vapor que alimenta a máquina a vapor. O sistema de aquisição assenta num sensor de temperatura e uma placa *Arduino* que possibilita o envio dos dados via cabo, *wireless* ou rede móvel.

1.5 Estrutura da Dissertação

Primeiramente é feita uma breve contextualização histórica do objeto de estudo e o seu enquadramento na unidade industrial onde se situa - FPVM e também uma introdução aos conceitos e funcionamento da máquina a vapor, elemento fundamental deste estudo.

Apresenta-se um breve estado da arte sobre a análise de vibrações e termografia, no contexto da conservação do património cultural e histórico e um enquadramento dos

conceitos e fundamentos teóricos relacionados com a aplicação ao objeto de estudo das técnicas de manutenção selecionadas, a análise de vibrações e de temperatura (por via da termografia e da medição com sensores instalados nos equipamentos).

Descrevem-se os métodos e equipamentos utilizados, incluindo o desenvolvimento dos sistemas de aquisição, processamento e tratamento de dados, necessários para o efeito, assim como os resultados obtidos.

Por fim, apresenta-se um capítulo de conclusões, no qual se fazem algumas considerações sobre o trabalho desenvolvido e resultados obtidos e a sua contribuição nomeadamente para a constituição de um registo de referência do funcionamento da máquina a vapor da fábrica de Vale de Milhaços, importante para a monitorização da condição a longo prazo, tendo em vista o prolongamento da vida funcional deste objeto histórico e a possibilidade de ser visitado e estudado em condições reais de funcionamento; e ainda algumas considerações sobre os futuros trabalhos a desenvolver.

2. A Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços

Com mais de um século, e ainda em condições de funcionamento, existem várias máquinas a vapor preservadas em vários locais do mundo como é por exemplo o caso da máquina a vapor de tripla expansão, de 1929, do Museu da Energia, em *Langford* em Inglaterra; da antiga máquina a vapor de *Stretham*, em *Cambridgeshire*, em Inglaterra construída em 1831; do engenho de *Whitebread*, deslocado para o *Powerhouse Museum*, na Austrália, onde foi restaurado e se mantem em pleno funcionamento; ou das locomotivas a vapor preservadas em alguns lugares do mundo, e como é também o caso da máquina a vapor da FPVM, com cerca de 120 anos, que se supõe ser única por não ter sido ainda deslocada do enquadramento industrial em que foi instalada, sendo possível de visitar e estudar em situação real de funcionamento.

Surgem cada vez mais, tentativas para atualizar e reviver este tipo de máquinas, reforçando assim a importância de estabelecer mecanismos de manutenção que permitam conhecer melhor o seu padrão de funcionamento e assegurar a sua boa condição a longo prazo.

2.1 Breve Contextualização Histórica

A FPVM, situada em Corroios, Seixal, é uma das memórias vivas da época industrial em Portugal e foi considerada em 2012 um monumento de interesse público (Presidência do Conselho de Ministros, 2012).

A produção de pólvora negra na FPVM iniciou-se em 1896. No entanto, o seu funcionamento pouco durou devido a um acidente em 1897 que destruiu as oficinas e causou a morte a vários trabalhadores. Em 1898, a Companhia Africana de Pólvora S.A.R.L colocou de novo a fábrica em funcionamento, seguindo os modelos tecnológicos mais avançados da época (importados da Alemanha e França) que a tornavam mais eficiente e segura, sendo de assinalar o sistema de transmissão de energia mecânica à distância, ligando o edifício principal – onde funcionava a caldeira e a máquina de vapor – a outros oito conjuntos de edifícios (Filipe, 2019).

No edifício central, considerado o coração da fábrica e com uma área de 396 m², estão presentes as caldeiras, a máquina a vapor responsável pela produção da energia mecânica e os volantes de inércia responsáveis por transmitir o movimento de rotação fornecido pela máquina. Estão ainda presentes: um condensador, uma bomba que faz chegar a água às caldeiras e as tubagens que conduzem o vapor à máquina.

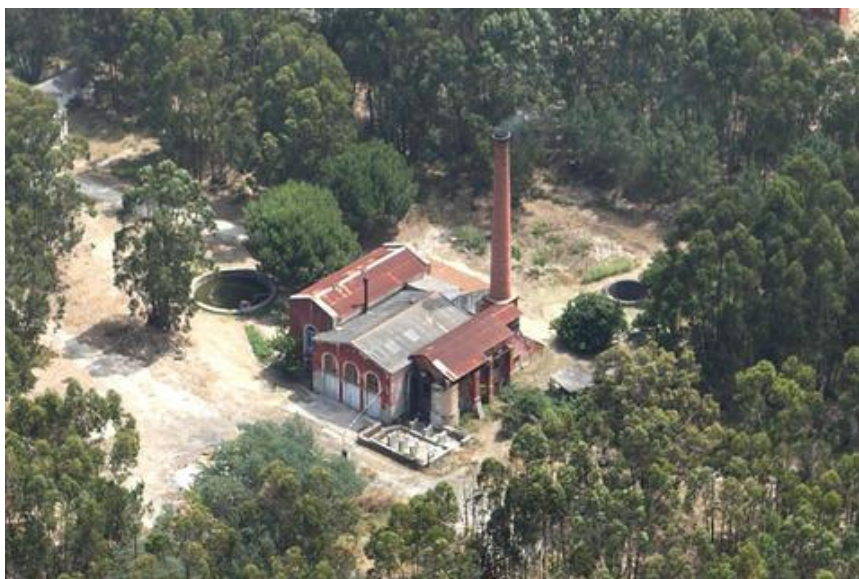


Figura 4 - Edifício central, o “coração da fábrica” (cm-seixal.pt)

A FPVM constitui assim um exemplo importante da tecnologia do vapor em Portugal, aproximando-se dos modelos franceses e alemães contemporâneos, mas sobressaindo do contexto técnico existente por reunir adaptações das soluções técnicas à realidade do fabrico em Portugal. A implementação da unidade industrial organizada de forma longitudinal permitiu que o processo de fabrico tenha permanecido ativo durante cem anos, sendo uma inovação técnica essencial para o reconhecimento do seu valor patrimonial e dando a conhecer as novidades tecnológicas europeias da época, em especial a fábrica da pólvora francesa de *Sevrans-Livry* (fundada em 1873) (Custódio, 2012).

A máquina a vapor, em particular - uma *Joseph Farcot & Fils* de 1900 de 125 cv - requeria a maior atenção, porque as máquinas a vapor tinham deixado de funcionar na Europa com o fim da 2.^a Guerra Mundial. A manutenção do seu sistema de transmissões era importante uma vez que, com a revolução da eletricidade, aquele processo havia deixado de ser usado (Custódio, 2012).

Esta unidade industrial sobressai ainda hoje, mais de 20 anos após cessação da sua atividade, pelo facto de manter uma máquina a vapor e uma caldeira em demonstração de funcionamento, requerendo um tipo de conservação e manutenção próprias (Custódio, 2012).

2.2 Características e Funcionamento da Máquina a Vapor

A máquina a vapor é um tipo de máquina térmica que funciona por ação de vapor. Neste tipo de máquinas o calor é utilizado para produzir trabalho mecânico, obedecendo o seu funcionamento às leis da termodinâmica.

A máquina a vapor pode ser vista como um dispositivo que tem por objetivo realizar trocas de energia entre um subsistema a alta temperatura, um subsistema de baixa temperatura e um subsistema mecânico. A máquina térmica propriamente dita é um quarto subsistema, também conhecido como subsistema auxiliar. Uma máquina térmica opera ciclicamente, de forma que, em cada ciclo, a sua substância de trabalho é submetida a uma sequência de processos termodinâmicos. Pela primeira lei da termodinâmica, ao completar um ciclo, a substância de trabalho volta ao seu estado inicial, logo, nesse período, o seu saldo da variação de energia é nulo (Sauerwein, 2012).

Segundo (Brunetti, 2012), as máquinas térmicas podem classificar-se em função do comportamento do fluido e da forma como se obtém o trabalho mecânico, classificando-se respectivamente em motores de combustão externa (a combustão é exterior ao fluido, sendo este apenas o veículo da energia térmica que será convertida em trabalho) e motores de combustão interna (o fluido participa diretamente na combustão); e em motores alternativos (trabalho é obtido pelo movimento de um pistão, transformando esse movimento em rotação por um sistema biela-manivela); motores rotativos (trabalho obtido diretamente por um movimento de rotação) e motores de impulso (trabalho obtido pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor).

A máquina a vapor, pilar da Primeira Revolução Industrial e objeto de estudo deste trabalho, é assim constituída por um motor alternativo, alimentado através de um processo de combustão externa. O motor alternativo, também conhecido como motor de pistão, usa um ou mais pistões para converter pressão em movimento giratório, podendo designar-se de dupla ação quando se movimenta em ambas as direções dentro do cilindro. Na maioria dos casos, o movimento linear do pistão é convertido em movimento de rotação, sendo usado um volante para garantir a rotação suave ou para armazenar energia.

Na máquina a vapor, o fluido de trabalho é o vapor de água sob alta pressão e temperatura, sendo que este vapor é produzido por meio de uma combustão que ocorre numa caldeira. O funcionamento da máquina a vapor baseia-se no princípio de expansão do vapor, que resulta na diminuição da sua temperatura e energia interna. Essa energia interna perdida pela massa de gás é transformada em energia mecânica pela força exercida sobre um embolo (pistão), cujo movimento aciona um mecanismo de rotação através de um sistema biela-manivela (Brunetti, 2012).

Quadro 2 – Outras classificações dos motores a vapor

Característica	Classificação do motor	
Eixo do motor	Horizontal	Eixo do cilindro está colocado na horizontal
	Vertical	Eixo do cilindro está colocado na vertical
Velocidade do motor	De alta velocidade	Velocidade maior ou igual a 250 rpm
	De velocidade mediana	Velocidade entre 100 a 250 rpm.
	Motor lento	Velocidade inferior a 100 rpm
Trabalho baseado na expansão ou não expansão	Motor expansivo	O vapor é introduzido em todo o curso do pistão. A sua movimentação é causada pela alta pressão do vapor que se movimenta de uma ponta a outra do pistão até sair.
	Motor não expansivo	O vapor é introduzido em apenas uma parte do curso do pistão, em seu interior ocorre a expansão
Escape do motor	Para atmosfera:	O vapor é libertado na atmosfera, cuja pressão é maior ou igual à pressão atmosférica, logo não é possível que este vapor seja reutilizado para outro ciclo do motor..
	Condensador	Estes motores libertam vapor dentro dos condensadores, o qual é condensado e enviado novamente para a caldeira pela bomba de alimentação (o vapor é reutilizado).
Número de cilindros	Motor simples	A conversão da energia térmica em energia mecânica acontece em apenas um estágio, tendo um cilindro e um pistão.
	Motor composto	A conversão acontece em dois estágios, sendo um com alta pressão e outro com baixa pressão.
	De expansão tripla	A conversão acontece em três cilindros/pistões sucessivamente.
	De expansão quadrupla	A conversão acontece em quatro cilindros/pistões.

A máquina a vapor preservada em Vale de Milhaços (Figura 6), fabricada pela empresa *Joseph Farcot*, em *Saint-Ouen* (Paris, França) em 1900, identificada com o número de construção 2085, possui um motor a vapor de dupla ação e uma bomba de água, tem uma potência nominal de 125 cavalos vapor (equivalente a 92 KW) e a velocidade do volante de inércia é de 75 rotações por minuto (condições nominais de funcionamento).



Figura 5 - Máquina a Vapor e Volante de Inércia (cm-seixal.pt)

Conforme consta no Certificado de Instalação e de Exame de Funcionamento de motor a vapor, outorgado pela autoridade responsável pelo licenciamento industrial, é, quanto à sua instalação, um motor fixo de 1ª categoria, tipo VH1 (alternativo, horizontal de simples expansão) (Filipe, 2017). Quanto ao comportamento do fluido, esta máquina a vapor tem um motor de combustão externa, sendo a água (na forma de vapor) o veículo da energia térmica produzida.



Figura 6 - Sistema de Válvulas da Máquina a Vapor

Esta máquina destinava-se a produzir a energia utilizada em todo o complexo de oficinas, em processos como a trituração, mistura, granulagem, secagem, entre outros, o que implicava que o seu funcionamento era praticamente permanente durante o horário de funcionamento da fábrica.

Apresentam-se na Figura 7, de forma esquemática, os principais componentes envolvidos na produção da energia térmica que supria as necessidades energéticas de toda a fábrica, compreendendo:

1. Reservatório/condensador de água
2. Caldeira alimentada a lenha
3. Cilindro contendo no seu interior um pistão conectado a um volante de inércia através de uma biela
4. Roda (volante de inércia), que permite que a energia mecânica produzida seja transmitida a um cabo que a distribui por todo o complexo

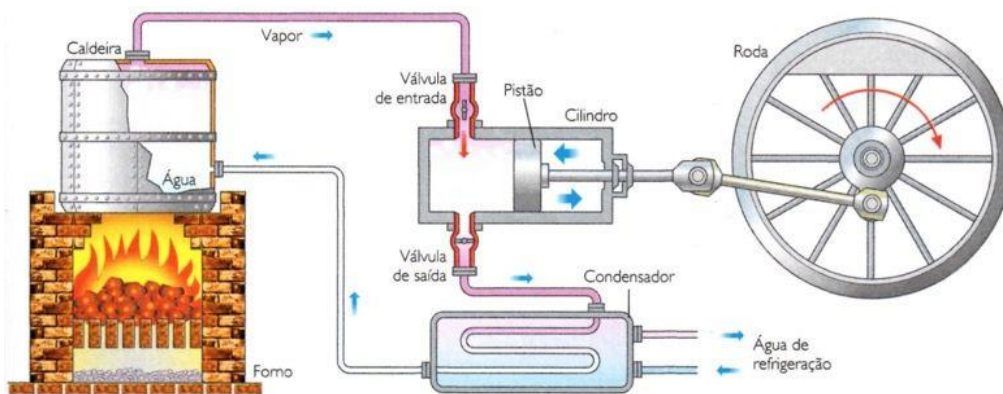


Figura 7 - Esquema de funcionamento simplificado (Arias, 2017)

Volante de Inércia

Trata-se de uma roda de ferro fundido com 4,6 m de diâmetro, como se pode verificar na Figura 8, composta por duas partes ligadas entre si, acionada pelo veio motor da máquina a vapor. Este transmite energia de modo contínuo ao volante de menor diâmetro, multiplicando a velocidade de rotação, impedindo flutuações desta. O volante de inércia regulariza o movimento da máquina a vapor na medida em que armazena energia, quando a máquina precisa dela para continuar o seu movimento com regularidade (Filipe, et al., 2012).



Figura 8 - Volante de Inércia

Processo de Funcionamento

1. A água proveniente de um poço próximo é elevada através de uma bomba para um tanque. A partir deste tanque a água é conduzida através de dois tubos: o primeiro tubo conduz a água até à caldeira; e o segundo tubo conduz a um sistema de bombeamento auxiliar denominado popularmente por “burrinho”;
2. O vapor de água produzido na caldeira, é introduzido no cilindro da máquina através de um sistema de tubagens revestidas por um material isolante;
3. A admissão da máquina é iniciada por meio de uma válvula operada manualmente;
4. O pistão inicia o movimento linear que é transformado em movimento circular através de uma biela conectada a um volante de inércia.
5. O arrefecimento do vapor consegue-se através da ligação da câmara do cilindro ao condensador. O vapor é conduzido ao condensador e transportado para o poço de arrefecimento (poço ao ar livre).

Inicialmente, é necessária a operação manual das válvulas de escape e admissão do vapor. Com o movimento do pistão, a operação das válvulas faz-se automaticamente, dado que o seu acionamento está ligado ao movimento do eixo do motor por meio de um tirante e um regulador centrífugo que controla a quantidade de vapor que entra e sai. De igual forma, o abastecimento de água para a caldeira também é automatizado através do sistema de bombeamento - bomba de alimentação principal, alimentado pelo funcionamento da máquina através de um sistema de correias (Arias, 2017).

À semelhança de outros cilindros documentados, em máquinas a vapor da empresa Farcot & Fils, o cilindro desta máquina estará revestido por uma substância isolante (lã ou feltro), seguindo-se-lhe um invólucro de madeira polida, para o proteger do arrefecimento, por forma a que a sua temperatura se mantenha o mais elevada possível evitando que o vapor perca pressão ao entrar na câmara (Sabino, 2007).

2.3 Caldeiras

Apesar de existirem no complexo industrial, duas caldeiras geradoras de vapor, uma datada de 1898, marca *Pierre Dumora* (desativada) e outra, de 1911, do fabricante J. Perez, apenas esta última está em atividade. Esta caldeira pertence à categoria das caldeiras flamotubulares horizontais de fornalha interna e é alimentada a lenha.

Em contexto industrial a caldeira seria abastecida com água de um poço da fábrica e bombeada para os depósitos aéreos para armazenamento. Em média, diariamente eram consumidos 20000 litros de água no funcionamento da máquina. Atualmente este

abastecimento é feito pela rede pública e a água continua a ser armazenada nos depósitos aéreos.

De qualquer das formas a condução da água desde os reservatórios aéreos até à caldeira pode ser feito de três formas diferentes: impulsão da bomba de alimentação principal, impulsão da bomba de alimentação independente (“burrinho”) ou gravidade.

O abastecimento por gravidade ocorre quando é necessário encher a caldeira após limpeza ou reparação. Este abastecimento distingue-se dos outros pelo facto de nos outros a caldeira ter água suficiente ao funcionamento. No abastecimento através da bomba de alimentação principal o vapor produzido pela caldeira é usado para acionar a máquina que, devido à ligação entre a haste do êmbolo e o veio da bomba, põe esta em funcionamento simultâneo com a máquina. O abastecimento de água através da bomba de alimentação independente, o “burrinho” (Figura 9), ocorria quando, apesar de a máquina a vapor não estar em funcionamento, era necessário vapor à estufa de secagem da pólvora (Filipe, et al., 2012).



Figura 9 - Bomba de Alimentação Independente "Burrinho"

O gerador de vapor é formado por dois tubos cilíndricos horizontais, em chapa de ferro de cerca de 7 m de comprimento. O tubo cilíndrico exterior, de maior diâmetro (170 cm), assente sobre pilares de tijolo, constitui o depósito de água e vapor. Na parte superior a caldeira dispõe do capacete ou cúpula, pequeno corpo cilíndrico vertical, também em chapa de ferro, comunicando com o depósito de água e vapor (cilindro horizontal). O capacete é exteriormente revestido por cimento refratário e eleva-se verticalmente acima da restante estrutura de proteção da caldeira, construída em tijolo. O espaço ocupado pela água ronda os 2/3 (dois terços) da capacidade total da caldeira, sendo o espaço restante

reservado ao vapor que se vai gerando na caldeira. O tubo cilíndrico de menor diâmetro (105 cm) e que ocupa o interior da caldeira, alberga a fornalha ou câmara de combustão. Esta parte da caldeira compreende a grelha, o cinzeiro e o altar (também designado por muro). O cinzeiro, parte inferior da fornalha delimitada entre o tampo plano frontal (espelho) e o altar, recebe as cinzas da lenha queimada e deixa entrar o ar para a fornalha, sendo o seu volume regulado pela porta do cinzeiro, que é utilizada como registo (Filipe, et al., 2012).

Características principais da caldeira (Filipe, 2017):

1. Tipo: ab;
2. Superfície Aquecimento: 45m²;
3. Temperatura Máxima Admissível: 158°C;
4. Capacidade Total: 11450 litros;
5. Timbre (pressão máxima/limite segurança): 6.86 bar (nas atuais circunstâncias está reduzido a 5 bar);



Figura 10 - Aspeto das Caldeiras (cm-seixal.pt)

2.4 Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração inclui um condensador e um tanque de refrigeração (Filipe, et al., 2012):

- Condensador – de condensação direta, destina-se a condensar o vapor não consumido pela máquina a vapor. É composto por um tubo de grande diâmetro dividido internamente por uma grelha perfurada, em comunicação direta com o cilindro da

máquina e com a bomba de alimentação principal, pelo tanque (do condensador) e pela válvula de alimentação. Situa-se sob o cilindro, no porão da casa da máquina.

- Tanque de refrigeração (Figura 11) – cilíndrico, para a água de circulação do condensador, tem 11 m de diâmetro interior e 1,80 m de profundidade e capacidade de armazenamento de 35 000 litros de água, restringindo-se aos 25 000 litros em situação normal de funcionamento. Concêntrico com as paredes do tanque, dispõe-se um tubo circular (sustentado por pilaretes de cimento assentes no fundo do tanque) com seis agulhetas em bronze, por onde é libertada a água condensada, a qual, em contacto com o ar, arrefece.



Figura 11 - Tanque de refrigeração

2.5 Manutenção do Sistema de Geração de Energia

Referem-se de seguida os procedimentos de manutenção realizados ao longo do tempo nos equipamentos, nomeadamente (Filipe, et al., 2012):

Caldeira - para minimizar o efeito destrutivo das lamas e sais que se depositavam, devido ao não tratamento da água do gerador de vapor, eram introduzidas placas de zinco no interior da caldeira, substituídas anualmente, permitindo reduzir a formação de incrustações. Contudo, uma vez que o zinco não é eficaz com todos os sais minerais ou com as matérias orgânicas, acabavam por se formar incrustações que necessitavam de remoção manual (picagem, remoção, retificação da superfície e lavagem). A partir da década de 70 passaram a ser adicionados produtos químicos para remover os detritos do interior da caldeira.

Uma das questões mais importantes em relação à caldeira é o facto de atualmente esta ser mantida sempre aquecida, mesmo quando a máquina não está em funcionamento. Ao ser mantida sempre a uma certa temperatura, isto é, evitando o arrefecimento total dos materiais, proporciona-se uma maior durabilidade dos mesmos, dado que as oscilações de temperatura são responsáveis por uma maior degradação. É através do conhecimento desta necessidade que surge uma das propostas deste trabalho, a construção de um sistema

de monitorização que permita aos responsáveis da fábrica controlar a temperatura da caldeira, retirando a necessidade de deslocação presencial.

Máquina a Vapor – a lubrificação da máquina a vapor é essencial para a manutenção e conservação do cilindro e dos restantes componentes, por isso ela ocorre em noventa e seis pontos repartidos entre os vários componentes da máquina, incluindo a lubrificação que ocorre com a utilização da almotolia quando a máquina se encontra em funcionamento. O sistema de lubrificação é constituído por:

- Sete copos com regulador de gota visível – responsáveis pela injeção de valvulina no interior do cilindro enquanto este está em funcionamento.
- Sete copos de torcida com tampa – copos com canal interno pelo qual escorre óleo que lubrifica o braço da máquina e veios.
- Caixas lubrificadoras – caixas que contêm uma anilha mergulhada em óleo que lubrifica os veios.

A realidade da manutenção aplicada à máquina a vapor está, atualmente, dependente do conhecimento do operador da máquina, conhecimento este apenas relacionado com a experiência de muitos anos que este possui no manobramento da máquina. Este, através de reconhecimento sonoro ou do reconhecimento de mudanças no funcionamento é capaz de associar alterações a falhas de componentes. Este facto é um dos mais relevantes para a realização deste trabalho. É necessário, para a continuidade do funcionamento da máquina, que o conhecimento deste operador seja estudado, colocado num registo formal e associado a resultados obtidos experimentalmente através de vários testes ao funcionamento da máquina.

3. Métodos e Equipamentos

3.1 Análise Vibracional

A realização de uma análise vibracional da máquina a vapor e de componentes como a bomba de alimentação principal constitui um dos elementos principais deste trabalho. A recolha de sinais correspondentes ao funcionamento é, por si só, uma inovação, na medida em que este tipo de testes nunca foi realizado nos objetos em causa. A recolha, tratamento, análise e registo destes sinais é encarado como o primeiro passo para uma mudança de paradigma na manutenção da máquina, estabelecendo-se o objetivo de que esta técnica possa, não só alargar o conhecimento, mas também vir a contribuir de forma efetiva para a conservação do estado funcional da máquina, integrando o conhecimento empírico existente atualmente com técnicas de manutenção industrial.

3.1.1 Fundamentos Teóricos

A vibração caracteriza-se pelo movimento oscilatório de uma qualquer partícula ou corpo em torno da sua posição de equilíbrio estático.

As vibrações periódicas estão diretamente relacionadas com os acontecimentos repetitivos que ocorrem durante o funcionamento dos equipamentos, que são comuns em máquinas como funcionamento cíclico como motores, geradores, turbinas e motores alternativos, sendo que todas as máquinas vibram durante o seu funcionamento (Miljković, 2015).

As características de vibração de uma máquina podem fornecer muita informação sobre o seu estado de condição. Durante o funcionamento, as peças da máquina estão sujeitas a fadiga, desgaste, deformação e assentamento da fundação. Com o desenvolvimento de falhas a vibração produzida pelo equipamento contém informação sobre as falhas desenvolvidas, podendo o sinal vibratório servir como base para indicadores para deteção precoce de falhas (Miljković, 2015).

A análise de vibrações consiste então na procura de resultados que caracterizem o comportamento de um sistema quando submetido a esforço dinâmico, assentando na utilização de ferramentas matemáticas para a modelação e previsão de potenciais problemas e soluções, que normalmente não são óbvios na fase de conceção de projetos e que podem resultar na necessidade de efetuar algumas modificações de *design*, após o seu fabrico e instalação, para resolução dos problemas de vibração (ADAMS, 2010).

Todas as máquinas produzem movimento oscilatório durante o seu funcionamento normal, assinalando-se, contudo, como preocupantes os sinais com amplitude elevada à

velocidade de rotação do equipamento e múltiplos desta, com ruído anormal ou contendo choques (Wowk, 2020).

Estas vibrações aceleram o desgaste e levam à falha prematura. A primeira tarefa para a análise de vibração de um sistema passa pela obtenção de dados do funcionamento, dados estes contendo informações sobre as amplitudes e relação com as frequências. A frequência permite estabelecer a causa para a vibração (localização do desequilíbrio, defeito, etc) e a amplitude dá informação sobre a severidade do problema (Wowk, 2020).

Apresenta-se na Figura 12, um esquema da abordagem da análise de vibrações.

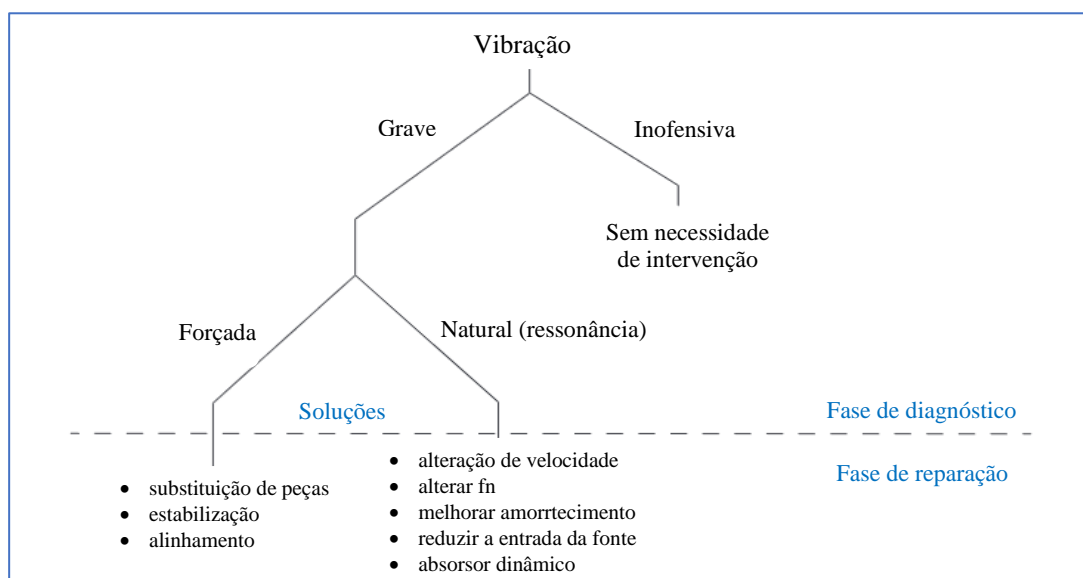


Figura 12 – A abordagem da análise de vibrações (Wowk, 2020)

As vibrações de origem natural são um efeito da estrutura e podem apresentar características como amplitudes muito elevadas ou o facto de serem fortemente direccionais. Se as características apontarem para a ressonância então são necessários testes adicionais: ensaio de impacto nos componentes do sistema, ensaio utilizando um agitador de velocidade variável, avaliação das formas de deflexão operacionais e finalmente avaliação do arranque e paragem do sistema. As vibrações forçadas, ou provocadas, resolvem-se com a colocação de massas, alinhamento ou substituição de peças com defeitos (Wowk, 2020).

As vibrações da máquina são captadas por transdutores de vibração (principalmente acelerómetros). Após o pré-processamento de dados (que inclui normalização de dados e remoção de ruído) os sinais de vibração podem ser analisados em vários domínios de sinal (temporal e espectral). O tratamento posterior dos dados é geralmente efetuado (por ex, uso de vários indicadores) para reduzir a dimensão dos dados.

Conhecendo a relação entre as frequências e os tipos de defeitos, é possível determinar a causa e a gravidade das falhas ou condições problemáticas. O histórico da máquina e o padrão de degradação anterior são importantes para determinar a condição operacional atual e futura da máquina.

A vibração de uma máquina pode ter origem em várias fontes como por exemplo, rolamentos, engrenagens e desequilíbrio e até mesmo pequenas amplitudes de vibração podem ter um efeito significativo na vibração geral da máquina, dependendo da função de transferência, amortecimento e ressonância (Lacey, 2010).

O registo e monitorização de dados sobre vibrações pressupõem a utilização de sistemas de medição e aquisição. São instalados acelerómetros em pontos chave dos equipamentos, que permitem a deteção das vibrações emitidas durante o funcionamento e a sua medição e registo recorrendo a *software* existente.

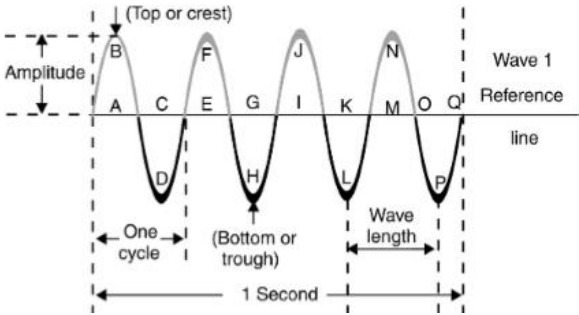
Os dados de vibrações são adequados para detetar anomalias subtis e para ser integrados com outro tipo de informação baseada na condição. Podem ser preparados relatórios periódicos dos equipamentos monitorizados, assinalando a severidade dos problemas, e a forma de os resolver, assegurando o seguimento e a manutenção posterior; análise conjugada da informação proveniente das outras técnicas aplicadas, pois uma tecnologia serve de suporte e complemento à outra. Devem ser estabelecidos níveis de alerta, com base em normas ISO e ANSI.

O histórico do equipamento deve ser usado para estreitar os níveis de alarme e atingir o desempenho e a vida útil ideais do equipamento. Os valores de referência de vibração podem ser estabelecidos em testes pós-manutenção, para os componentes principais, por forma a assegurar que os valores registados correspondem a boas condições de funcionamento dos equipamentos e a definir o padrão de funcionamento normal do equipamento, em relação ao qual será possível detetar desvios e anomalias.

As falhas da máquina causarão uma mudança na forma do espectro de frequência das vibrações. A presença de tal falha pode, portanto, ser detetada comparando dois espectros de frequência registados na mesma máquina em momentos diferentes. A causa da falha pode então ser diagnosticada determinando quais os componentes de frequência que aumentaram, e cruzando-os com as peças da máquina (Brown).

Apresentam-se no Quadro 3, alguns conceitos básicos associados à análise de vibrações.

Quadro 3 – Conceitos básicos da análise de vibrações

Frequência Natural	Frequência à qual um objeto irá vibrar quando sujeito a uma vibração livre – resposta após aplicação de uma condição inicial (Sequeira, 2012).	A equação de movimento é dada por: $m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + kx = 0$ m – Massa c – Amortecimento k – rigidez
Movimento harmónico	O movimento harmónico é a forma mais simples de vibração; todo o movimento harmónico é periódico, logo, irá repetir o seu movimento em intervalos iguais de tempo. Quando representado graficamente em função do tempo, fornece-nos uma curva harmónica (Sequeira, 2012).	O movimento do corpo vibrante pode ser descrito através da expressão: $x(t) = A \sin(\omega t)$ t – Tempo (segundos) x(t) – valor do deslocamento A = amplitude w = frequência circular
Ângulo de Fase	Se considerar duas ondas idênticas em frequência em que se verifica um atraso no tempo de uma em relação à outra então pode-se afirmar que existe uma diferença de fase. O atraso de fase é medido em ângulo de fase. (Scheffer, et al., 2004)	
Frequência	A frequência corresponde ao número de vibrações ou ciclos por unidade de tempo. A unidade frequentemente utilizada é o hertz (Hz) que corresponde a uma oscilação por segundo. (Scheffer, et al., 2004)	
Comprimento de onda	O comprimento de onda é a distância no espaço ocupada por um ciclo em qualquer instante. Observando a figura, representativa de uma onda, podemos identificar o comprimento de onda como sendo por exemplo a distância entre A e E, na Figura 13.	 <p>Figura 13 – Propagação de uma onda</p>
Amplitude	A amplitude de uma onda (Figura 1) dá uma indicação relativa da quantidade de energia que a mesma transmite. Corresponde ao pico de uma onda em relação a uma linha de referência. As características da vibração (deslocamento, velocidade e aceleração) são medidas de forma a determinar a severidade de uma vibração e são normalmente referenciadas através da amplitude de vibração.	<p>Existem nesta característica várias relações: (Sequeira, 2012)</p> <p>a. RMS – ou Valor eficaz, é a medida do nível de vibração mais utilizada por estar associada ao valor de energia contida no movimento. Corresponde à raiz quadrada do somatório dos quadrados de todos os pontos da curva de vibração:</p> $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$ <p>b. Pico – tem em consideração apenas o máximo atingido no pico positivo, medido em relação à linha de referência, não tendo conta eventual evolução temporal do sinal. $RMS = 0,707 \times \text{Pico}$ Esta fórmula só se aplica para sinais harmónicos puros.</p> <p>c. Pico-a-Pico – Refere-se à amplitude total de onda (mede a diferença entre o pico positivo e o pico negativo).</p>

3.1.2 Estado da Arte

A monitorização de vibrações é provavelmente a técnica de manutenção preditiva mais amplamente utilizada em equipamentos industriais, podendo ser aplicada a uma vasta variedade de equipamentos rotativos (Lacey, 2010). É efetivamente, um dos mais antigos e melhores métodos para recolher e analisar informação sobre a condição de um equipamento, tendo uma longa história de aplicação em vários campos de atividade, em particular máquinas mecânicas e produção de energia (Miljković, 2015; Alimkhan, et al., 2019).

É amplamente reconhecido que o aumento do nível de vibração das máquinas representa um desvio da sua condição de funcionamento ideal. Até nos tempos mais antigos, a mecânica avaliava o estado de condição da máquina pelas suas características do ruído, sendo o método de monitorização da vibração baseada neste princípio. O método de monitorização da vibração é baseado neste princípio (Lacey, 2010).

A monitorização de vibrações tem evoluído de forma significativa acompanhando a modernização da indústria e transportes, encontrando-se atualmente numa nova era, na qual a tecnologia MEMS¹ (*micro eletromechanical systems*) tem um papel relevante no desenvolvimento de novas aplicações, por permitir o uso alargado deste tipo de instrumentação. Devido à sua capacidade de integração funcional e facilidade de aquisição, é hoje possível por meio do processamento avançado do sinal no ponto de deteção, simplificar a informação da monitorização, acrescentando a possibilidade de acesso remoto, através de canais de comunicação adequados (Looney, 2014).

Contudo, no que respeita à monitorização de condição de património industrial, não se encontraram referências relativamente à aplicação da análise de vibrações a máquinas a vapor funcionais, preservadas até aos dias de hoje. Refere-se por esta razão um trabalho relativo a centrais térmicas de produção de energia, por se aproximar ao tipo de funcionamento do objeto de estudo e um trabalho relacionado com manutenção de edifícios e estruturas com interesse patrimonial, área onde esta técnica tem sido reconhecidamente mais aplicada.

Moshage, et al. (1993), em um relatório sobre “Monitorização de vibrações para a manutenção preditiva em centrais térmicas de produção de energia”, refere que a manutenção de equipamento e as paragens inesperadas resultantes de uma falha, podem representar uma parcela significativa do custo de manutenção de uma central de produção de energia e que tal como na maioria dos motores rotativos, as máquinas nestas centrais

¹ Esta tecnologia desenvolveu-se consideravelmente nos últimos anos, estando atualmente disponíveis no mercado muitos destes sensores. A tecnologia dos MEMS permite a miniaturização, a produção em massa e a redução do custo

sofrem frequentemente com os efeitos da vibração. Referindo que apesar de ser inevitável alguma vibração, a vibração excessiva pode causar a deterioração prematura dos componentes dos equipamentos e eventualmente resultar na falha completa de uma unidade. Este relatório faz por isso referência à necessidade de um programa de manutenção preditiva, recorrendo à monitorização das vibrações eletronicamente e utilizando medições regulares por forma a obter um registo que permita distinguir os sinais de vibração normais, dos sinais excecionais.

Arias, (2017), no trabalho desenvolvido sobre “Fábrica de pólvora de Vale de Milhaços: *Structural analysis of a steam power generating plant*”, procurou caracterizar o comportamento dinâmico do edifício principal da Fábrica de Vale de Milhaços, em função do funcionamento da máquina a vapor. Para o efeito, foram colocados 8 acelerómetros nas paredes da casa da máquina, 6 deles capazes de registar vibrações numa direção e 2 deles com capacidade para registar vibrações em duas direções. Num primeiro ensaio utilizou-se como fonte de excitação a vibração ambiental e num segundo ensaio, a máquina a vapor foi colocada em funcionamento nominal e usada como fonte extra de excitação. Os resultados obtidos são apresentados, a título exemplificativo, na Figura 14, com máquina (a) e sem a máquina (b) em funcionamento para apenas um dos acelerómetros. Em a) pode-se observar que a máquina funcionou durante 150 segundos. Note-se a diferença de amplitudes do sinal que se verifica quando a máquina está em funcionamento.

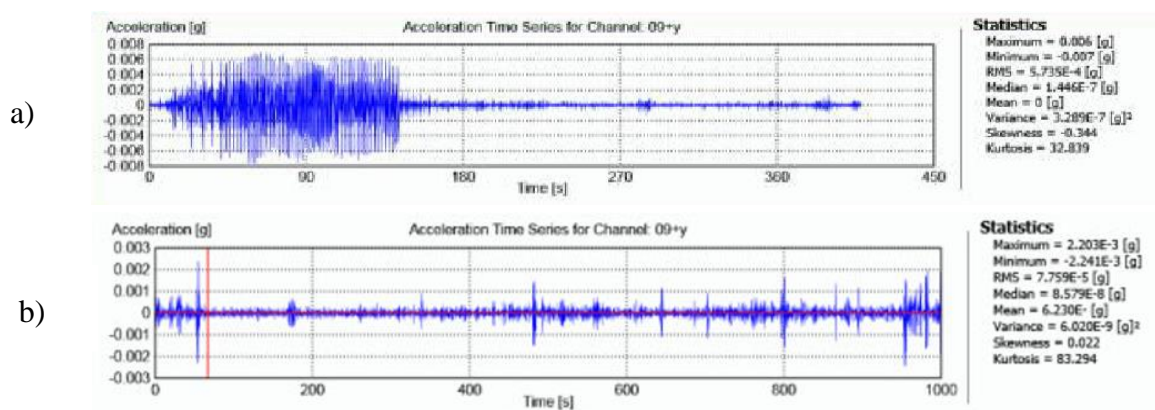


Figura 14 - Registo de vibrações, com máquina em funcionamento (a) e sem máquina (b)

Após a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência, os resultados apresentados por (Arias, 2017), permitiram ao autor concluir sobre a insignificante influência da máquina no comportamento dinâmico da edificação, justificando-se esta conclusão pelo facto de as frequências ressonantes da estrutura se concentrarem entre os 4 Hz e os 10 Hz e o funcionamento da máquina com uma frequência de 75 RPM, equivalente a 1,25 Hz, não conseguir excitar frequências tão altas. Foi também considerado relevante para os resultados deste estudo, o facto de a máquina

estar apoiada sobre um pedestal de betão, rígido, que reduz a transmissão da vibração à estrutura.

O trabalho intitulado “*Vibrations and Museum Collections*” de Johnson, et al. (2019) permite concluir que a análise de vibrações tem desempenhado um papel importante também na preservação de coleções em museus, concretamente por avaliar em diversas situações o efeito das vibrações causadas pela passagem de pessoas e pelos trabalhos de construção nas imediações propondo propostas para minimizar esses efeitos.

3.1.2.1 Aquisição e Processamento de Sinais Vibratórios

A aquisição de sinal vibratório é usualmente realizada com recurso a acelerómetros. O princípio de funcionamento do acelerómetro piezoelétrico baseia-se na deformação dos cristais piezoelétricos no interior do transdutor, que gera um sinal elétrico proporcional à aceleração na superfície da máquina. Desta forma, o transdutor acompanha as vibrações transmitidas pela máquina devido a uma força de valor igual ao produto da aceleração com a massa sísmica (Morais, 2016).

A análise de vibrações começa com um sinal, variável no tempo, recolhido por um sensor ou um transdutor (Shreve, 1995). Apresenta-se na Figura 15, um fluxograma com indicação das várias fases de aquisição e processamento do sinal vibratório.

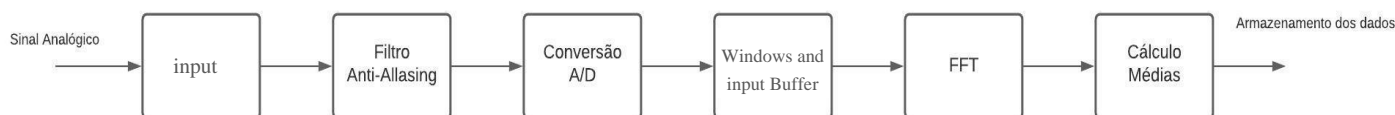


Figura 15 – Fluxograma da aquisição e processamento de sinal vibratório

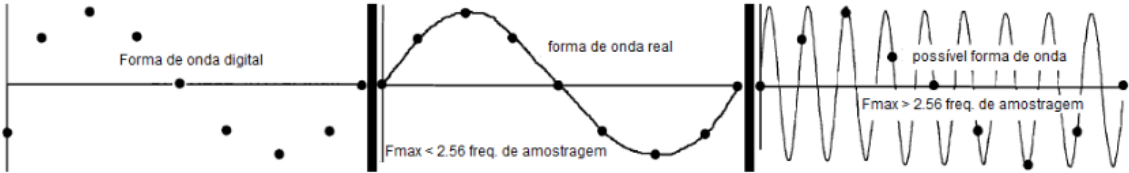
O sinal analógico é recebido pelos acelerómetros que convertem a vibração física num sinal elétrico. Esta conversão do sinal analógico em sinal elétrico respeita uma frequência de amostragem estabelecida. A frequência de amostragem não é mais do que a velocidade a que são gravadas as amplitudes do sinal analógico que serão usadas para a reconstrução da onda em formato digital. Uma frequência de amostragem errada pode provocar uma perda de informação da onda, designado por fenómeno de *Aliasing*, o qual se apresenta com mais detalhe no Quadro 4.

Atualmente, o *hardware/software* para recolha de dados permite de forma integrada a aquisição e processamento dos dados adquiridos. Tipicamente, estes dados são condicionados por janelas de aquisição que procuram garantir que a amplitude do sinal nas extremidades deste é nula (ver descrição no Quadro 4). A resposta de um sistema pode ser representada através de amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração,

todas no domínio do tempo ou da frequência. No domínio do tempo é possível observar a variação da amplitude do sinal em função do tempo. Já no domínio da frequência é possível observar o conteúdo em frequência do sinal adquirido, associando valores de amplitude a valores de frequência específicos, valores estes que podem ser relacionados com a manifestação de fenómenos no equipamento.

O processo de análise espectral é o conjunto de técnicas matemáticas que permitem obter o conteúdo em frequências de qualquer sinal. Das técnicas matemáticas utilizadas destaca-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), muito usada para a análise de sinais no que respeita à recolha de informações sobre o funcionamento de máquinas.

Quadro 4 – Conceitos importantes no processamento de sinais vibratórios

Frequência de amostragem	<p>A amostragem é o processo de captar amplitudes de ondas em determinados instantes (amostras) e com isso reconstruir as curvas que estavam inicialmente na forma analógica. Para que as curvas geradas sejam o mais próximas das ondas reais é necessário determinar a que velocidade as amostras devem ser captadas. Esta velocidade é determinada através do <u>Teorema de Nyquist-Shannon</u> - para não se perder informação contida num sinal amostrado é necessário que a frequência de amostragem seja, pelo menos, duas vezes o valor da frequência de interesse contida no sinal. (Wowk, 2020)</p>
Aliasing	<p>Fenómeno com origem na formação de ondas a frequências mais baixas do que as reais, resultando que componentes de altas frequências sejam apresentadas com valores menores. Este fenómeno está diretamente relacionado com uma frequência de amostragem abaixo de 2 vezes a frequência de interesse do sinal. Devido a este fenómeno, os analisadores utilizados atualmente já estão munidos de um filtro <i>anti-aliasing</i>. Este filtro permite remover todas as vibrações presentes no sinal analógico que possuem frequências superiores a metade da frequência de amostragem.</p>
 <p>Figura 16 – Fenómeno de Aliasing</p>	
Windowing	<p>O sinal analógico é sujeito a amostragem com intervalos de tempo fixos, o que leva à possibilidade de existirem descontinuidades no início e no fim da janela de aquisição. Assim, é necessário reduzir esses extremos através de um processo de aplicação de janelas ao sinal. Após a conversão do sinal analógico em digital, e antes de sujeitar o mesmo ao algoritmo FFT, executa-se o processo designado <i>Windowing</i>. Este método aplica-se com o objetivo de reduzir os efeitos da dispersão de sinal. A aplicação de janelas, é uma forma de eliminar descontinuidades do sinal ao forçar a zero a amostragem de dados no início e no fim do período de amostragem, tornando o sinal aparentemente constante. Existem várias funções de janela aplicadas no processamento de sinal: <i>Retangular</i>; <i>Flat top</i>; <i>Hanning</i>; <i>Hamming</i>; <i>Blackman</i>; <i>Barlett</i>.</p> <p>Hanning – Janela mais aplicada devido à viabilidade da mesma em diversas situações. Apresenta resultados satisfatórios entre a precisão relativamente à amplitude e à frequência. As amplitudes do espectro são aproximadas das amplitudes reais e as frequências de componentes inexistentes são reduzidas</p>

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A forma mais comum de processamento de sinal é conhecida como FFT, ou Transformada Rápida de Fourier. É um método que permite transformar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, apresentando valores de amplitude e fase em função da frequência. Associando as frequências com as características da máquina e analisando as amplitudes, é possível detectar problemas com alguma precisão (Shreve, 1995).

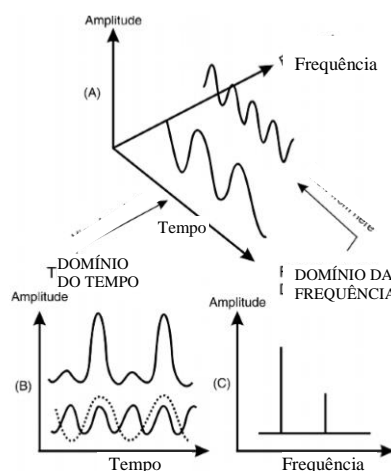


Figura 17 – Transformação de espectro no domínio do tempo para domínio da frequência, através da FFT (Scheffer, et al., 2004)

Cálculo de Médias (*averaging*)

A utilização de cálculo de médias tem como objetivo reduzir o efeito de ruído ou vibração aleatória, destacando-se 4 técnicas (Girdhar, et al., 2004):

- Linear – Uma das técnicas mais utilizadas. Cada medição é adicionada à anterior e no fim é feita a divisão pelo número total de adições;
- Peak hold* – Neste método o maior valor (pico) é registado em cada parcela. O espectro final será constituído apenas pelos picos registados;
- Tempo síncrono – Utiliza sinais síncronos e faz a média no domínio do tempo;
- Exponencial – É dada maior relevância às medições mais recentes, estabelecendo uma função exponencial.

3.1.2.2 Análise e Interpretação de Sinais Vibratórios

A análise de vibrações teve a sua evolução muito centrada no controlo de máquinas rotativas devido à sua forte implementação na indústria, em comparação com as máquinas alternativas. Daí que a abrangência de estudos e a catalogação de defeitos típicos seja superior para as máquinas rotativas.

Algumas das falhas típicas detectadas pela análise de vibrações são (Brady, 2002; Lacey, 2010):

- Desalinhamento;
- Folgas Mecânicas;
- Falhas em bombas centrífugas (Cavitação);
- Falhas nos rolamentos;
- Desequilíbrio;
- Empeno do veio;
- Defeitos na transmissão por correia;
- Fissuras no Veio;
- Ressonância.

a) Desalinhamento

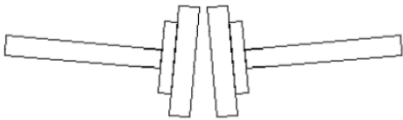
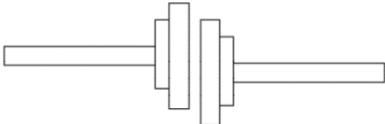
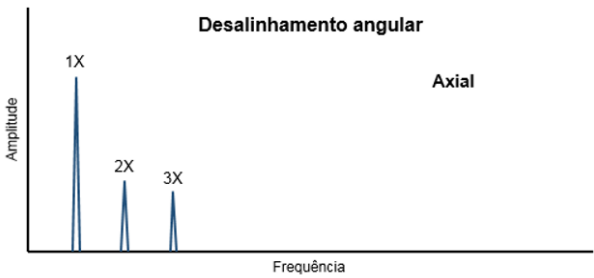
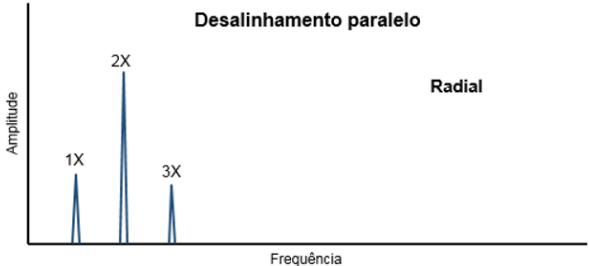
O desalinhamento pode ser definido como a não coincidência entre o eixo de simetria de dois eixos colineares. Isto acontece quando eixos, acoplamentos ou rolamentos não são devidamente alinhados ao longo das linhas de centro geométrico (Brady, 2002).

O desalinhamento angular acontece quando os eixos acoplados formam um ângulo entre si e o desalinhamento paralelo ocorre quando as linhas dos centros geométricos estão paralelas, mas deslocadas. Usualmente, de forma prática, não se observam de forma isolada, mas uma combinação de ambos.

Os desalinhamentos são falhas mecânicas que geram vibrações em frequências próximas da rotação da máquina.

Apresentam-se no Quadro 5, os tipos de desalinhamentos que ocorrem nos equipamentos e o tipo de vibrações produzidas (gráficos espectrais FFT) para cada um deles.

Quadro 5 – Tipos de desalinhamentos e tipo de vibrações produzidas (Brady, 2002; Girdhar, et al., 2004)

 <p>Desalinhamento angular</p>	 <p>Desalinhamento paralelo</p>
<p>Desalinhamento angular</p>  <p>Os desalinhamentos angulares originam, observando gráficos espectrais FFT, vibrações na direção axial com elevadas amplitudes em frequências próximas da frequência de rotação (1X RPM) e na segunda harmônica (2X RPM) e possivelmente na terceira harmônica (3X RPM). (Girdhar, et al., 2004).</p>	<p>Desalinhamento paralelo</p>  <p>Este tipo de desalinhamento gera gráficos similares aos desalinhamentos angulares, mas as vibrações predominantes são na direção radial. Como não existe um desalinhamento puro, o espectro de frequências mostrará uma maior amplitude em 2X RPM, mas também em 1X RPM e 3X RPM (menos significativo). (Girdhar, et al., 2004).</p>

b) Empenamento do Veio

Um veio empenado vibra com características semelhantes ao desalinhamento. As vibrações são visíveis tanto nas medições axiais como nas radiais. Apenas uma análise de fase permite distinguir estes defeitos. Ao analisar o espectro de frequências, se o empenamento for próximo ao centro do eixo, a amplitude dominante será na frequência de 1X RPM, mas se for próximo ao acoplamento, a amplitude dominante será na frequência de 2X RPM, conforme Figura 18 (Girdhar, et al., 2004).

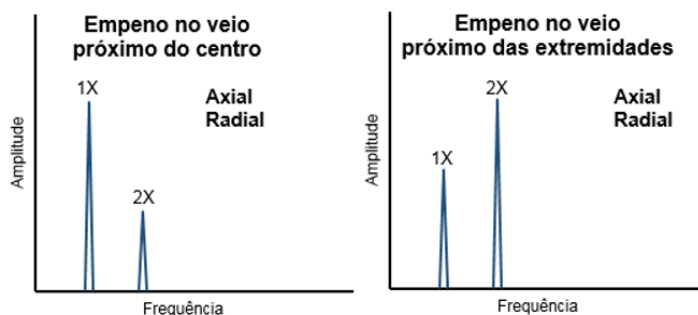


Figura 18 – Tipo de vibrações produzidas devido a empeno do veio (Girdhar, et al., 2004)

c) Desequilíbrio

O desequilíbrio é a condição na qual o centro de massa de um rotor não está contido no seu eixo de rotação (Mais, 2002).

Existem três tipos de desequilíbrio:

- a) Desequilíbrio estático – Quando o eixo principal de inércia de um rotor está deslocado e paralelo em relação ao eixo de rotação. Este tipo de desequilíbrio pode ser observado com a máquina desligada, daí a designação de estático.
- b) Desequilíbrio de momento – Quando o eixo principal de inércia intercepta o eixo de rotação no centro de gravidade do sistema. Este desequilíbrio ocorre devido à presença de massas iguais em extremidades e lados opostos do rotor em relação à linha de centro.
- c) Desequilíbrio dinâmico – De forma simples este desequilíbrio resulta de uma combinação do desequilíbrio estático e do desequilíbrio acoplado.

Em todos os tipos de desequilíbrio, o espectro de frequência irá mostrar uma amplitude de vibração dominante na frequência de funcionamento do equipamento. A variação de amplitude varia proporcional ao quadrado da velocidade de rotação. O espectro da Figura 19 refere especificamente vibração na direção radial, no entanto, no caso de rotores em balanço a direção em que o desequilíbrio se manifesta é axial.

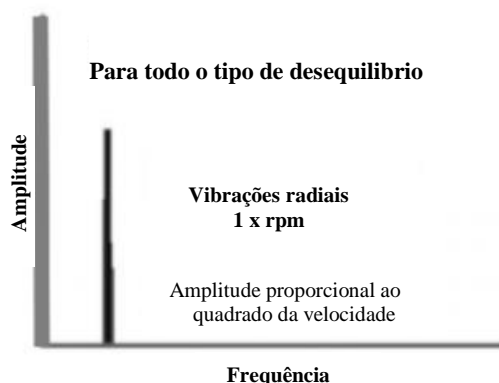
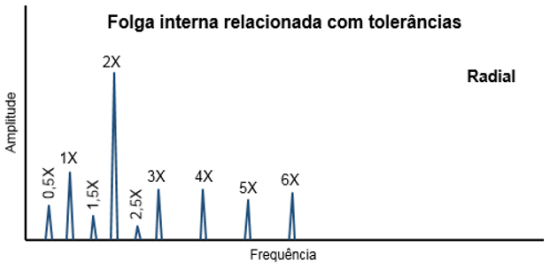
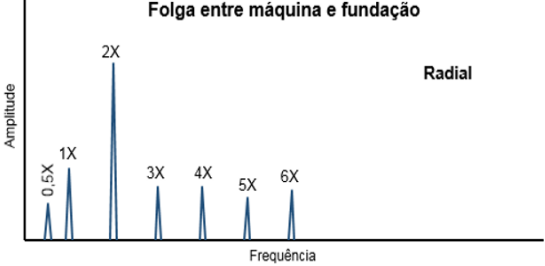
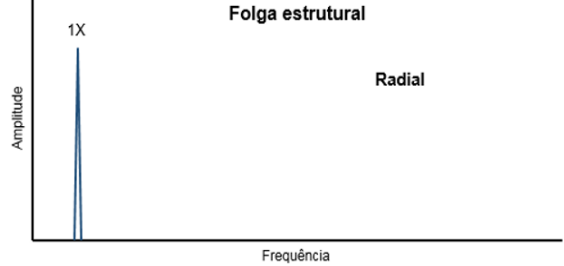


Figura 19 – Tipo de vibrações produzidas devido a desequilíbrio (Girdhar, et al., 2004)

d) Folgas Mecânicas

Apresentam-se no Quadro 6, o tipo de vibrações associado a cada tipo de folga mecânica que se verifica nos equipamentos.

Quadro 6 – Tipo de folgas mecânicas e tipo de vibrações produzidas (Girdhar, et al., 2004)

<p>Folgas internas da máquina - Devem-se a ajustamentos incorretos ou elementos soltos. Produz um espectro FFT irregular preenchido com harmônicas. Pode gerar também sub-harmônicas.</p>	<p>Folga interna relacionada com tolerâncias</p> 
<p>Ligação entre a máquina e a fundação – Relacionado com apertos defeituosos de parafusos que fixam a máquina. Gera um espectro com várias harmônicas com amplitudes elevadas.</p>	<p>Folga entre máquina e fundação</p> 
<p>Estrutura – Folgas estruturais ou enfraquecimento da fundação. Medições feitas em apoios da fundação mostram um espectro em 1X RPM</p>	<p>Folga estrutural</p> 

e) Cavitação

A cavitação é o fenómeno de vaporização de um líquido pela redução da pressão, durante o movimento. Quando a pressão é reduzida drasticamente para valores próximos dos valores de tensão de vapor do fluido, surgem bolhas causadas pela vaporização do fluido. A implosão destas bolhas tem potencial energético suficiente para causar danos internos na bomba. A implosão das bolhas resulta num espectro com zonas aleatórias a altas frequências (Figura 20).

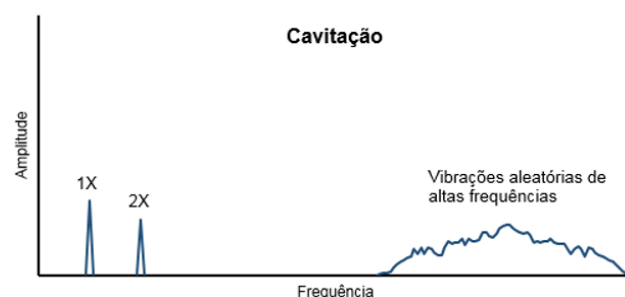


Figura 20 – Tipo de vibrações produzidas devido a cavitação (Girdhar, et al., 2004)


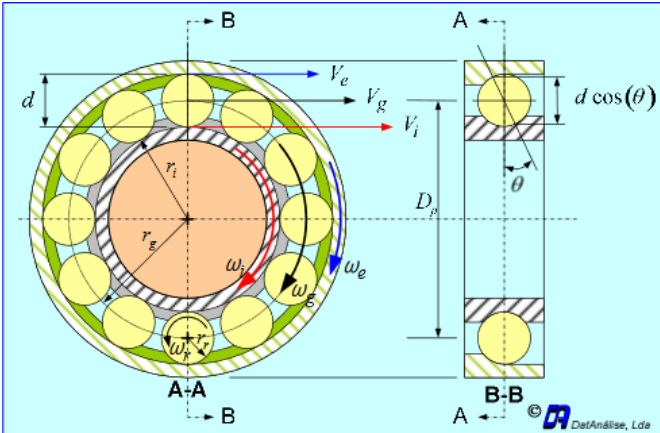
f) Falhas em Rolamentos

Os rolamentos suportam e guiam os elementos rotativos ou oscilantes das máquinas e transferem cargas entre os componentes da máquina. Existem quatro tipos de rolamentos principais: de deslizamento, de esferas, de rolos e rolamentos axiais.

A constituição de um rolamento é: duas pistas, uma interna, onde será encaixado o veio, e uma pista externa que é colocada sobre a carcaça da bomba. Entre as duas pistas existe um conjunto de esferas ou rolos, que rodam livremente dentro da pista (Figura 21).

Apresentam-se no Quadro 7, as frequências fundamentais emitidas por um rolamento defeituoso e as expressões para as calcular.

Quadro 7 – Frequências emitidas por um rolamento defeituoso (Roque, et al., 2007):

 <p>(SKF, 2000)</p>	<p>FTF (<i>Fundamental Train Frequency</i>) – Frequência emitida por um defeito de gaiola, calculada pela seguinte expressão:</p> $FTF = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) + f_e \left(1 + \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right]$
	<p>BSF (<i>Ball Spin Frequency</i>) – Frequência emitida por um defeito superficial na esfera ou rolo quando entra em contacto com a pista interna ou externa, calculada pela seguinte expressão:</p> $BSF = \frac{D_p}{2d} (f_i - f_e) \left[1 - \left(\frac{d \cos \theta}{D_p} \right)^2 \right]$
<p>Figura 21 – Constituição de um rolamento</p> <p>Legenda: N – Número de esferas ou rolos; f_i – Frequência de Rotação da pista interna; f_e – Frequência de Rotação da pista externa; f_g – Frequência de Rotação da gaiola; f_r – Frequência do rolo ou esfera; d – Diâmetro da esfera ou rolo; D_p – Diâmetro primitivo; θ – Ângulo de contacto</p>	<p>BPFO (<i>Ball Pass Frequency of the Outer Race</i>) – Frequência emitida por uma esfera ou rolo quando passa por um defeito superficial na pista externa, calculada pela seguinte expressão:</p> $BPFO = \frac{N}{2} (f_i - f_e) \left[1 - \left(\frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right]$
	<p>BPFI (<i>Ball Pass Frequency of the Inner Race</i>) – Frequência emitida por uma esfera ou rolo quando passa por um defeito superficial na pista interna, calculada pela seguinte expressão:</p> $BPFI = \frac{N}{2} (f_i - f_e) \left[1 + \frac{d \cos \theta}{D_p} \right]$

Apresenta-se na Figura 22, o espectro FFT correspondente à degradação de rolamentos, nos quais se identificam as seguintes zonas.

Zona A – Frequências da máquina e harmônicas;

Zona B – Zona de frequências de defeitos dos rolamentos;

Zona C - Frequências naturais dos elementos do rolamento;

Zona D - Altas frequências (HFD – *High Frequency Detection*);

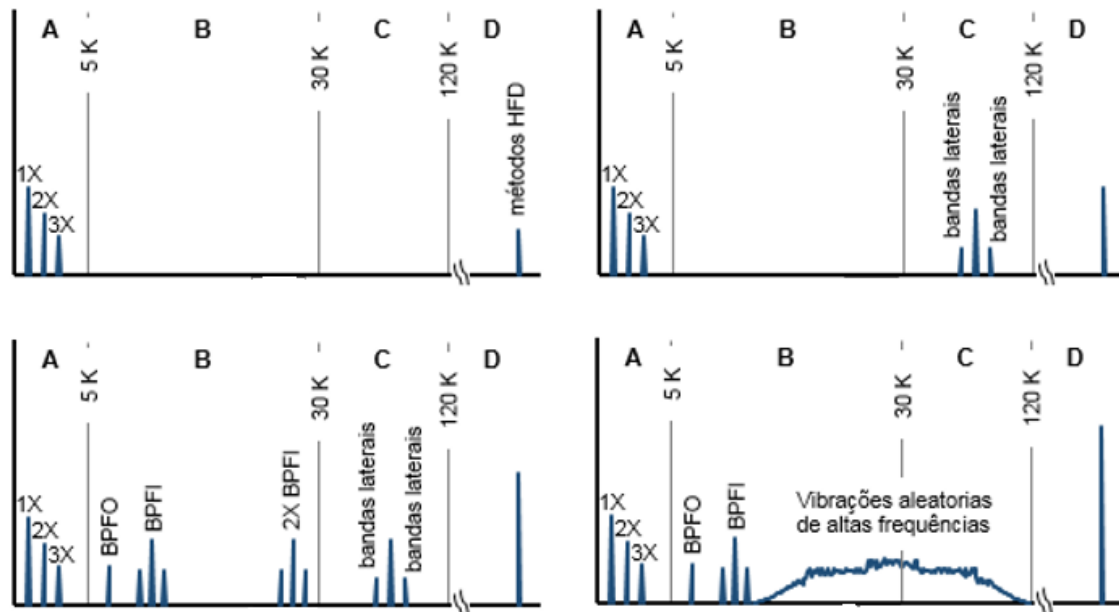


Figura 22 – Espectro FFT da degradação de rolamentos

g) Rolamentos de Escorregamento

Folgas elevadas em rolamentos de escorregamento

Defeitos típicos chumaceiras de escorregamento surgem sob a forma de harmônicos da velocidade de funcionamento, que podem ser até 10x ou 20x esse valor. O espectro FFT resultante aproxima-se muito dos espectros verificados quando existe folga mecânica (Girdhar, et al., 2004).

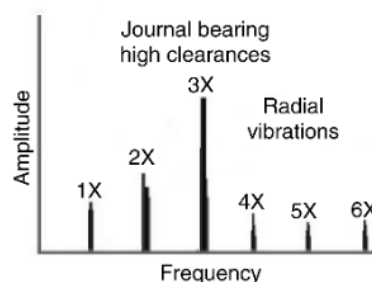


Figura 23- Espectro de frequências de folgas em rolamentos de escorregamento (Girdhar, et al., 2004)

Oil Whirl (Redemoinho de óleo)

O fenómeno de *oil whirl* é uma vibração causada por uma camada de óleo. Ocorre essencialmente em máquinas equipadas com rolamentos de escorregamento cuja lubrificação é feita por pressão, e que operam a velocidades elevadas.

A camada de óleo está presente entre o eixo e o rolamento (que se encontra parado) e idealmente deve rodar a uma velocidade de $0.5 \times \text{RPM}$. No entanto, perdas relacionadas com a fricção levam a que a camada de óleo se movimente a uma velocidade de $0,42\text{--}0,48 \times \text{RPM}$. Sob condições normais, cria-se uma espécie de cunha, uma camada de óleo com pressão suficiente para manter o rotor numa posição "elevada" (equilibrada), não gerando vibrações. No entanto, se a pressão do óleo for demasiado elevada leva a que o veio entre em "colisões" dentro do rolamento (Figura 24), proporcionando um maior desgaste do mesmo (Girdhar, et al., 2004).

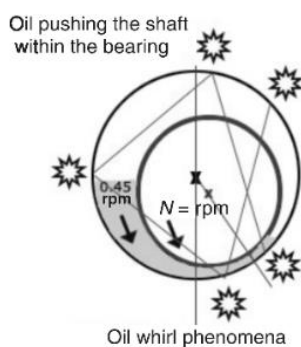


Figura 24 - Fenómeno de *Oil Whirl* (Girdhar, et al., 2004)

Dry Whirl

Resulta de uma lubrificação inadequada, que pode causar vibrações nos rolamentos. Esta vibração resulta da fricção entre o eixo e o rolamento. A fricção leva à excitação de outras partes da máquina. A vibração resultante apresenta elevadas frequências e possivelmente nenhuma harmónica.

3.1.3 Equipamento Utilizado

a) Acelerómetro – Sensor de Vibração

Para a recolha de sinais vibratórios na máquina a vapor e bomba de água da FPVM, foram utilizados acelerómetros piezoelétricos da marca *Briuel & Kjaer - B&K*, modelo 4507, conforme Quadro 8.

Este tipo de acelerómetro é muito utilizado em aplicações de análise estrutural e medições multicanal. O facto de terem sido desenhados para suportar ambiente industrial adverso, combinado com a sua alta sensibilidade, baixa massa e pequenas dimensões torna este modelo ideal para as medições propostas neste trabalho.

Quadro 8 – Especificações técnicas dos acelerómetros B&K


Especificações técnicas	
Intervalo de Frequência	0,4 – 6000 Hz
Temperatura	-54°C – 100°C
Peso	4,8 gramas
Sensibilidade	100mV/ms ⁻²
Unidade	mV
Frequência de Ressonância	18 kHz
Fonte: https://www.bksv.com/pt-BR/products/transducers/vibration/accelerometers/4507-B-002	

b) Placa Aquisição de Dados – Prosig P8012

Os acelerómetros são conectados a uma placa de aquisição de dados que vai guardar os resultados e convertê-los para que possam ser posteriormente tratados.

A placa utilizada é o modelo P8012 da marca Prosig, conforme Quadro 9.

Quadro 9 – Especificações técnicas da placa de aquisição de dados – Prosig P8012

Especificações técnicas	
Inputs Analógicos	24 Canais
Software	Possui software próprio – DATS for Windows
Comunicação	USB 2.0
Dynamic Range	105 dB
Vibração suportada	Adequado para uso móvel (7g RMS)
Temperatura de Operação	0°C - 40°C
Humidade	Até 80% humidade relativa
Alimentação	10 – 36 Volts DC ou Adaptador AC
Dimensões	50 mm x 290 mm x 270 mm
Extra	Filtros Anti-alias
Fonte: http://prosig.com/portfolio/p8012/	

c) Software

Para a recolha dos dados, foi utilizado o *software* comercial “DATS Data Acquisition”, disponibilizado pelo fabricante da placa de aquisição utilizada.

Complementarmente ao software de aquisição, a marca disponibiliza também o software “DATS Analysis”. Este software oferece possibilidade de tratamento e análise dos resultados. Apresenta um ambiente intuitivo com as operações a serem executadas através da utilização de diagramas de caixas.

Para a realização deste trabalho optou-se pela transição dos dados para um formato “.MAT”, para que a análise fosse realizada recorrendo ao *software Octave*.

A aplicação de FFT aos dados foi feita recorrendo ao seguinte código, no qual se observa a aplicação de uma janela *Hanning* antes da aplicação da FFT, opção disponível no *software Octave* (Figura 21).

Figura 25 - Algoritmo utilizado para aplicação da FFT

```
Programa_FFT.m
1 Fs=14018;
2 N=140180;
3 dt=1/Fs;
4 t=(0:N-1)*dt;
5 xn=DATSignals(:,2);
6 L = length (xn)
7 nfft = 2^nextpow2(L);
8 xn_HannWnd = xn.*hanning(L);
9 xnfft_HannWnd = fft(xn_HannWnd,nfft)/L;
10 mYdft = abs(xnfft_HannWnd);
11 mYdft = mYdft (1:nfft/2+1);
12 mYdft (2:end-1) = 2* mYdft(2:end-1);
13 f = Fs/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
14 s=2*mYdft;
15 plot(f,s)|
```

3.1.4 Procedimento para Medição de Vibrações

Para a realização da 1ª campanha de ensaios, foram utilizados 3 acelerómetros colocados em três pontos críticos da máquina a vapor, conforme Quadro 10:

- Chumaceira do veio excêntrico - Acelerómetro 1
- Corpo da máquina - Acelerómetro 2
- Chumaceira do volante de inércia - Acelerómetro 3





A realização da primeira campanha de medições foi efetuada, com a máquina em funcionamento. Um dos obstáculos para a realização desta medição prendia-se com a fixação dos acelerómetros. Devido às temperaturas e à humidade, a fixação dos acelerómetros com a usual cera não garantia a fixação destes e comprometia as medições. A solução encontrada foi a colocação de uma base com íman em cada acelerómetro que permitia a adesão às superfícies graças aos efeitos do magnetismo. Foram realizadas 7 medições durante a primeira campanha e cada medição foi efetuada durante um intervalo de 10 segundos. Optamos por este tempo de aquisição pois o equipamento mostrava um funcionamento algo instável. Através desta janela de aquisição procurou-se garantir alguns intervalos de funcionamento regular, bem como detetar as oscilações na velocidade de funcionamento. As medições efetuadas correspondem apenas ao funcionamento automático da máquina. O facto de não terem sido feitas medições durante o funcionamento manual da máquina está relacionado com o aumento de ruído ligado à movimentação das válvulas pelo operador. O sinal torna-se ainda mais variável, sendo difícil distinguir picos no espetro.

Para a realização da 2ª campanha de ensaios, os 3 acelerómetros foram colocados no corpo da bomba alimentação principal, e nas duas chumaceiras de escorregamento da bomba (conforme Quadro 10).

A segunda campanha, realizada em torno da bomba principal de alimentação, encontrava as mesmas dificuldades de adesão dos acelerómetros devido às superfícies com humidade. A solução encontrada foi a mesma que a utilizada na primeira campanha, recorrendo novamente a ímans. Foram realizadas 3 medições, todas elas com a bomba em funcionamento, alimentada pela operação da máquina a vapor, cada uma com o mesmo intervalo de tempo de 10 segundos.

Verifica-se no Quadro 10, não só a posição dos acelerómetros, identificados com círculos, mas também a direção em que estes se encontram a medir, marcada com setas nas figuras.

Quadro 10 - Colocação dos Acelerómetros

	1ª campanha medição (Máquina)	2ª campanha de medição (Bomba)
Acelerómetro 1 (Chumaceira do veio excêntrico)		
°Acelerómetro 2 (Corpo da máquina)		Na 2ª campanha de ensaios, os 3 acelerómetros foram colocados ao longo do corpo da bomba.
Acelerómetro 3 (Chumaceira do volante de inércia)		

3.2 Termografia

3.2.1 Fundamentos Teóricos

Consiste num ensaio não destrutivo que utiliza radiação infravermelha (IV) para medir temperaturas e observar padrões de distribuição de temperatura.

Para o efeito são utilizadas camaras termográficas, que trabalhando com comprimentos de onda entre os 3 e 14 μm , conseguem captar a radiação IV emitida por um corpo, assente no princípio de que qualquer corpo acima do zero absoluto emite radiação IV tanto maior quanto maior for a sua temperatura, formando imagens luminosas visíveis ao olho humano que em condições normais não seriam observadas.

A utilização desta técnica permite obter informações relativas às condições operacionais de um componente (Azeredo e Silva, 2012).

Este método destaca-se de outras técnicas pela ausência de contacto físico entre o equipamento de medição e o objeto e pela velocidade de inspeção, dada a rapidez com que se localizam e identificam problemas. Esta técnica apresenta outras vantagens, tais como a portabilidade e autonomia, a não interferência com o funcionamento da máquina e o facto de ser considerada uma técnica economicamente acessível. É muito utilizada na inspeção de componentes e estruturas em sectores industriais como a aeronáutica, transportes, energia eólica, engenharia civil e eletrónica.

A presença de defeitos a uma determinada profundidade interfere com o fluxo de calor que atravessa a superfície, provocando variações locais da temperatura superficial. Estas variações de temperatura são detetadas pela termografia e permitem fazer a correlação entre estas zonas e a presença de defeitos internos (Sousa, 2010).

As variações de temperatura podem ser analisadas de um ponto de vista qualitativo e quantitativo. A análise qualitativa é mais simples e utiliza-se quando é suficiente uma análise superficial para detetar problemas, como por ex^o a deteção de fugas e defeitos de isolamento. A análise quantitativa é mais complexa e demorada. As temperaturas superficiais são calculadas através de termogramas e parâmetros analíticos. Esta análise implica o levantamento rigoroso de todos os dados

A termografia pode ser dividida em (Faria, 2013):

- termografia passiva, muito utilizada no controlo de processos industriais, em que a temperatura é um parâmetro essencial no diagnóstico da condição do equipamento. Nesta variante, o material a inspecionar está a uma temperatura diferente do meio ambiente. Aplica-se na produção, manutenção preditiva, eficiência de edifícios e ainda no domínio dos ensaios não destrutivos.

- A termografia ativa implica que o material seja estimulado por uma fonte externa, resultando numa variação da sua temperatura. Esta excitação pode ser realizada através de dispositivos mecânicos, elétricos ou térmicos.

Transferência de Calor - Radiação

A transferência de calor corresponde à transmissão de energia entre dois sistemas, resultante de uma diferença de temperatura entre os mesmos (Kreith, et al., 2003).

A transferência de calor quantifica-se pelo fluxo de calor, cuja unidade é W/m^2 , e que representa a quantidade de calor transferido por unidade de área, na unidade de tempo (Incropera, et al., 2003).

Existem três modos de transferência de calor: radiação, convecção e condução. A condução e a convecção exigem a presença de um meio material para que ocorra a propagação. A radiação não necessita de um meio físico, sendo que a propagação ocorre por via de ondas eletromagnéticas (Bird, et al., 2004).

O processo físico através do qual o calor é transferido de um corpo em função da sua temperatura é designado por radiação térmica. Todos os corpos com temperaturas superiores a zero absoluto, 0 Kelvin, emitem radiação térmica.

A radiação térmica enquadra-se no grupo da radiação eletromagnética dado que resulta da emissão de energia pelos átomos, iões e moléculas que regressam aos estados de menor energia. As ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) e possuem comprimentos de onda variados (Assis, et al., 2013).

O espectro eletromagnético inclui um grande leque de comprimentos de onda que variam entre os pequenos, como por exemplo os raios gama, até aos grandes comprimentos de onda, como as ondas de rádio (Figura 26). A radiação térmica situa-se na zona compreendida entre os valores aproximados de $0,1 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$ (Kreith, et al., 2003).

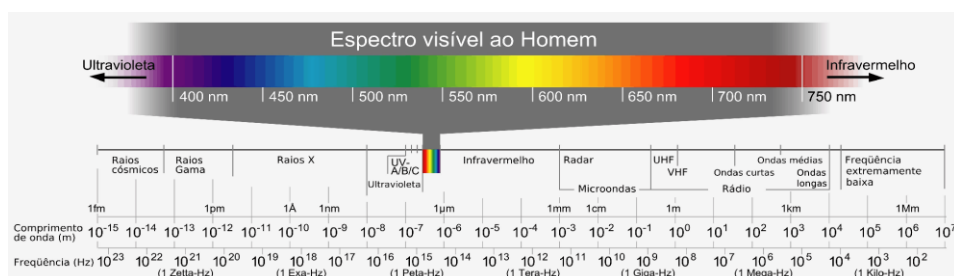


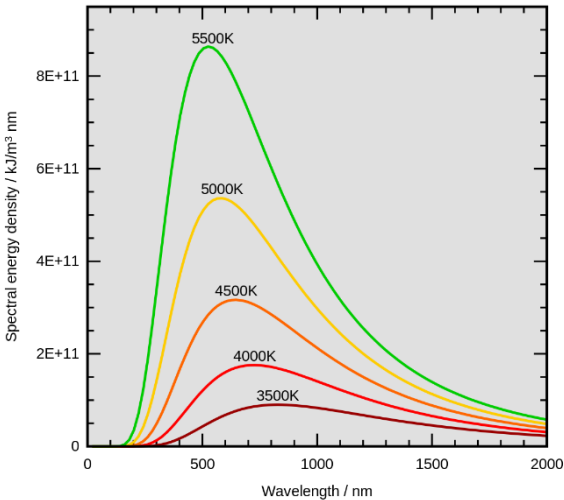
Figura 26 - Espectro Eletromagnético (fonte: <https://static.docsity.com>)

Da radiação que incide numa superfície, parte é absorvida pelo corpo, α , parte é refletida, ρ , e o restante é transmitida, τ .

Define-se um corpo negro como sendo um corpo que em equilíbrio térmico é capaz de absorver e emitir toda a radiação em qualquer comprimento de onda (Carlomagno, et al., 2010).

As leis físicas que regem a transferência de energia por radiação são: a lei de *Planck*, deslocamento de *Wien* e a lei de *Stefan_Boltzmann*, para um corpo negro, conforme Quadro 11.

Quadro 11 – Leis da física que regem a transferência de energia por radiação

Lei de Planck – Energia e Comprimento de Onda	
 <p>Figura 27 - Relação entre energia e comprimento de onda</p>	<p>Emitância – Quantidade de energia que um corpo emite por unidade de comprimento de onda.</p> <p>Através da Figura 27 consegue-se perceber que quanto maior a temperatura, maior a emitância espectral e mais curto o comprimento de onda.</p> <p>fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Wiens_law.svg/1200px-Wiens_law.svg.png</p>
Lei do Deslocamento de Wien - Temperatura e Comprimento de Onda	
<p>A lei do deslocamento de Wien relaciona a temperatura e o comprimento de onda de acordo com a seguinte equação: (Incropera, et al., 2003; Kreith, et al., 2003)</p>	$\lambda_{max} = \frac{B}{T}$ <p>λ_{max} – Comprimento de onda máximo(μm) T – Temperatura (K) B = 2898 – Constante de dispersão de Wien (μm)</p>
Lei de Stefan-Boltzmann - Temperatura e energia	
<p>A lei de Stefan-Boltzman relaciona a temperatura e a energia de acordo com a seguinte equação: (Incropera, et al., 2003; Kreith, et al., 2003) Através desta expressão podemos concluir que quanto maior a temperatura, mais intensa é a emitância espectral.</p>	$W_b = \sigma \cdot T^4$ <p>W – Energia Radiante total (W.m⁻²) σ – Constante Stefan-Boltzman= 5,67x10⁻⁸ (W.m⁻².K⁻⁴) T – Temperatura absoluta do corpo (K)</p>

A lei da conservação de energia implica que, para uma dada temperatura, a soma destes três componentes seja igual a 1 (Rodrigues, 2020).

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

A emissividade (ϵ) é a relação entre a energia irradiada pelo corpo em estudo à temperatura T e a energia radiada por um corpo negro à mesma temperatura, ou seja, a capacidade que um corpo tem de emitir radiação.

A lei de *Kirchoff* afirma que para qualquer material, a emissividade espectral é igual à absorção espectral de um corpo em quaisquer temperaturas e comprimentos de onda. Isto leva a que:

$$\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$$

Logo:

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Para um corpo real, a expressão dada pela lei de *Stefan-Boltzman* é dada como:

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

3.2.2 Estado da Arte

A técnica de termografia é muito utilizada em diversas áreas da engenharia, sendo também já utilizada para a caracterização e manutenção de património histórico.

Um exemplo deste tipo de trabalho é o documento elaborado por Andrés Bocanegra, aluno da Universidade do Minho, com o título “Fábrica da Pólvora de Vale de Milhaços: *Assessment of an industrial complex*”. Neste projeto o autor, além de outras tarefas, faz um levantamento das características térmicas do edifício principal da Fábrica da Pólvora de Vale de Milhaços com o objetivo de, por exemplo, determinar a influência que a ignição da caldeira teve nos elementos estruturais circundantes e as tensões térmicas a que os materiais foram sendo submetidos (Bocanegra, 2017).



Figura 28 - Casa das Caldeiras (Bocanegra, 2017)

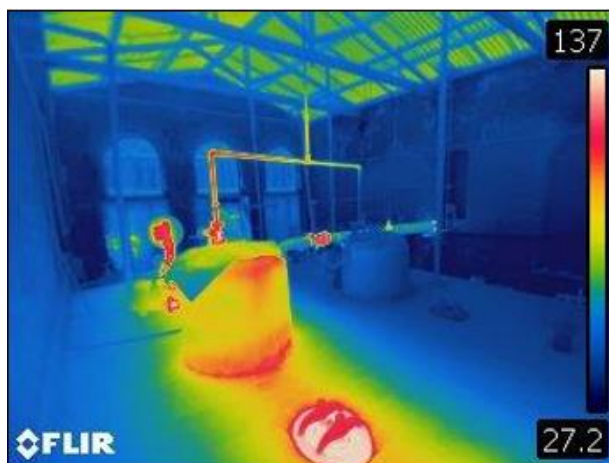


Figura 29 - Elementos presentes na área existente por cima da caldeira (Bocanegra, 2017)

A análise de dados, com base na Figura 28 e na Figura 29, permitiu não só entender a extensão da transmissão de calor, mas também determinar se esta extensão estava relacionada com alguns dos danos identificados nas estruturas.

Outro exemplo da utilização de técnicas de termografia é o trabalho desenvolvido por quatro investigadores italianos, intitulado “*3D Thermal Imaging System with Decoupled Acquisition for Industrial and Cultural Heritage Applications*”. Neste artigo os autores aplicam uma técnica de termografia 3D à estátua “*Madonna with the child*” do escultor Agostino di Duccio (Campione, et al., 2020).



Figura 30 - Estátua "Madonna with the Child" (Campione, et al., 2020)

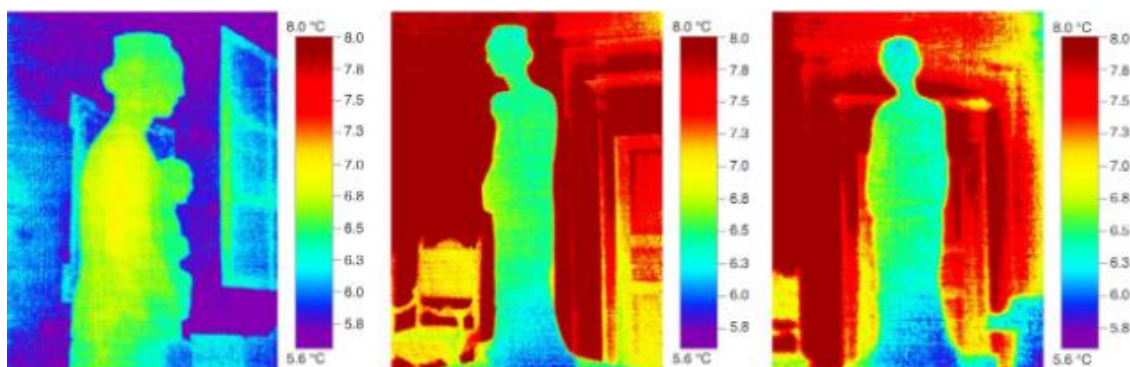


Figura 31 - Termogramas obtidos de várias posições (Campione, et al., 2020)

Este estudo foi realizado com o intuito de recolher informações técnicas importantes do ponto de vista do restauro e manutenção. Da análise das imagens termográficas (Figura 31) foi possível por exemplo concluir que existe um lado da estátua ligeiramente mais quente, enquanto a base e a cabeça apresentam temperaturas mais baixas. A explicação para este facto reside no sistema de iluminação que a estátua possui, ou então na proximidade desta a uma janela sem proteção contra os raios solares. Estas condições que provocam oscilações de temperaturas não são ideais para a preservação e podem vir a ter repercussões no futuro. Na conclusão do artigo os autores assumem que os resultados provam que este tipo de aproximação a objetos históricos tem um elevado potencial, especialmente no âmbito do restauro.

3.2.3 Equipamento Utilizado

a) Câmara de Infravermelhos Fluke Ti400


De acordo com a Fluke Corporation, uma câmara de imagem térmica é um sistema gerador de imagens dotadas de recursos para análise e medição de distribuições térmicas.



Figura 32 - Representação do Funcionamento da Câmara

Para a recolha das imagens térmicas da máquina a vapor, alguns componentes e das caldeiras foi utilizada uma câmara da marca Fluke – o modelo Ti400 (Quadro 12).

Quadro 12 – Especificações técnicas da câmara de infravermelhos

Especificações Técnicas – Fluke Ti400	
Gama de Medição de Temperatura	-20°C até +1200°C
Precisão na Medição da Temperatura	+/- 2°C
Compensação da temperatura refletida	Sim
Correção da emissividade	Sim
Frequência de Captação de Imagens	Taxa de atualização de 9 Hz ou 60 Hz
Gama Espectral	7,5 µm a 14 µm (ondas longas)
Temperatura de Funcionamento	-10°C até +50°C
Humidade Relativa	10% até 95% sem condensação
Armazenamento	Micro SD, Memória Flash, USB
Fonte: www.fluke.com	

b) Software

A informação recolhida fica armazenada na própria câmara, a qual permite o seu descarregamento via USB para um dispositivo de armazenamento.

É utilizado um software comercial da própria marca, o *Smartview*, disponibilizado pelo fabricante, que permite a observação e análise das imagens termográficas.

3.2.4 Procedimento para Recolha de Dados de Termografia

O objetivo da utilização da termografia centra-se na realização de uma caracterização, não só da máquina, apesar de ser o elemento central, mas também das tubagens que conduzem o vapor e da caldeira. Com esta caracterização pretende-se não só associar os diversos componentes às suas temperaturas de funcionamento, mas também iniciar um registo de temperaturas para comparações futuras, o que poderá conduzir à deteção de falhas.

A seleção dos elementos a estudar baseou-se na observação inicial de todos os elementos e na previsão teórica das zonas que poderiam estar expostas a um incremento de temperatura.

As imagens foram captadas com a máquina em operação de forma a assegurar que os resultados correspondem a condições “normais” de funcionamento de todos os componentes. As imagens foram recolhidas numa única campanha de recolha de dados.

3.3 Monitorização da Temperatura da Caldeira

3.3.1 Fundamentos Teóricos

A temperatura e o comportamento térmico dos componentes são os fatores mais críticos na manutenção dos equipamentos industriais. Valores de temperatura anormais indicam geralmente problemas em desenvolvimento. Por esse motivo, o controlo da temperatura é frequentemente considerado um fator-chave para o sucesso da manutenção fabril, sendo por isso o parâmetro mais frequentemente medido nesta área (IAEA, 2003).

Este capítulo refere-se ao desenvolvimento e aplicação de um sistema de medição por contato na zona da fornalha para estimativa da temperatura da caldeira, por forma a registar o seu comportamento em condições normais de funcionamento. Para o efeito, utilizou-se um sensor de temperatura e um sistema de aquisição de dados desenvolvido especificamente para o efeito.

Exigindo uma instrumentação mais complexa, a medição dos valores de temperatura associados ao funcionamento de um equipamento é efetuada através de sensores de temperatura (termopares), conectados a placas de aquisição de dados que, através de programação adequada, permitem a sua transferência para computadores, tornando possível a sua análise e tratamento.

Assumem assim particular importância neste tipo de técnicas, as tecnologias de informação e comunicação amplamente disponíveis e utilizadas na atualidade, as quais alicerçam a já designada quarta revolução industrial. A utilização destas ferramentas tem permitido não só o aumento da produtividade, mas também da segurança (Sung-Min Kim, et al., 2020).

No domínio da indústria, a automatização de processos é o modelo de produção e o controlo é feito por sistemas básicos constituídos por um input/sensor, um controlador e um output. É muito comum, por exemplo, a presença de sistemas de monitorização de temperatura em indústrias como a petrolífera e do gás.

Nas grandes indústrias a monitorização é baseada em sistemas como o PLC (*Power Line Communication*), DCS (*Distributed Control System*) e SCADA (*Supervisory control and data acquisition*). No entanto estes sistemas são muito complexos e dispendiosos para indústrias ou aplicações de pequena dimensão (Arsheen Mir, et al., 2018). É neste contexto que surgem as plataformas *open-source* como o Arduino, utilizadas neste trabalho e que se apresentam de forma mais detalhada no Anexo 1.

3.3.2 Equipamento Utilizado


Apresenta-se no Quadro 13, a lista dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do sistema de medição de temperatura da caldeira, que alimenta a máquina a vapor.

Quadro 13 – Lista do equipamento utilizado


Designação	Quantidade	Especificação
Sensor de temperatura	01	MAX6675 Type K Thermocouple Module
Complemento da placa Arduino	01	Módulo WiFi ESP8266 ESP-01
Placa de aquisição de dados	01	Placa Arduino Uno R3
Conectores	05	Cabos Jumper M/F
Conectores	05	Cabos Jumper F/F
Cabos de ligação	01	Cabo USB

Apresentam-se, no Quadro 14, Quadro 15 e Quadro 16, as especificações técnicas relevantes do equipamento utilizado.

Quadro 14 – Sensor MAX6675 K-Type Thermocouple Module

Especificações técnicas		
	Alcance de temperatura do termopar	0°C – 450°C
	Alcance da temperatura do sensor	1024°C
	Resolução de temperatura	0,25°C
	Voltagem	3V – 5,5V
	Corrente	50 mA

Quadro 15 – Módulo WiFi ESP8266 (Fonte: PTRobotics.com)

Especificações técnicas		
	Temperatura de funcionamento	-40°C até +125°C
	Power Input	4,5V ~ 9V
	Corrente	70mA (200mA max)
	Tamanho	48 x 25 mm
	Conexão	Micro-USB

Quadro 16 – Placa Arduino Uno R3

Especificações técnicas – Arduino Uno	
Microcontrolador	ATmega328
Velocidade de clock	16 MHz
Tensão operacional	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limite)	6-20 V
Pinos digitais de entrada/saída	14 (6 dos quais suportam um sinal de saída PWM)
Pinos analógicos de entrada	6
Corrente DC por pino de entrada/saída	40 mA
Corrente DC no pino de 3,3 V	50 mA
Memória Flash	32 kB (dos quais 0,5 kB são utilizados pelo <i>bootloader</i>)
Memória SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Dimensões	68,6 x 53,4 mm

A placa Arduino Uno é um modelo muito comercializado dada a sua versatilidade, o número de portas disponíveis e a compatibilidade com os shields Arduino.

Fonte: Arduino.cc

O diagrama mostra a placa Arduino Uno R3 com as seguintes legendas:

- LEDs TX (transmissor) e RX (receptor) da comunicação serial
- Conector USB para o cabo tipo AB
- Chip encarregado da comunicação com o computador
- Cristal de quartzo 16Mhz
- Regulador de tensão
- Conector fêmea 2,1mm com centro positivo
- Botão de reinicialização
- LED conectado à porta digital 13
- Pinos digitais de entrada e saída
- LED indicador de placa ligada
- Porta ICSP para programação serial
- Microcontrolador ATmega 328
- Pinos de alimentação
- Pinos analógicos

3.3.2.1 Montagem do sistema de medição e aquisição de dados

Foram elaborados dois projetos para o sistema de medição e aquisição de dados referentes à temperatura da fornalha da caldeira. O esquema destes projetos é apresentado Figura 33.

No primeiro esquema o sensor de temperatura foi ligado à placa Arduino que está ligada diretamente ao computador. Esta montagem torna possível não só acesso aos dados de temperatura, mas também possibilita que estes sejam descarregados para uma folha Excel para posterior tratamento.

No segundo esquema, em vez de uma placa Arduino, o sensor de temperatura foi ligado a um módulo que transmite os dados de forma remota para qualquer computador ou telemóvel conectado à rede WiFi existente na fábrica.

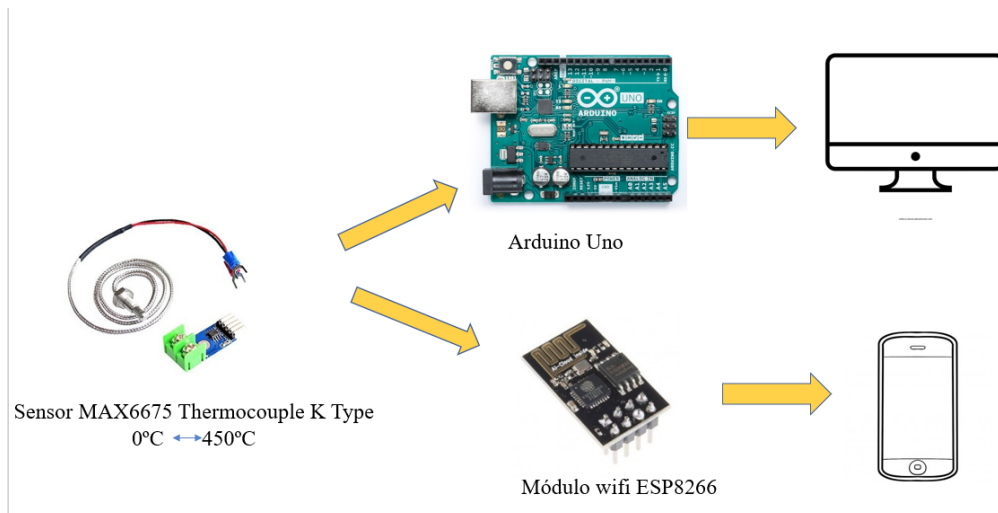


Figura 33 - Esquema dos projetos de monitorização da temperatura

Ligação entre a placa de Arduino e o Sensor de Temperatura

Apresenta-se na Figura 34 o esquema de ligação entre o sensor de temperatura e a placa Arduino.

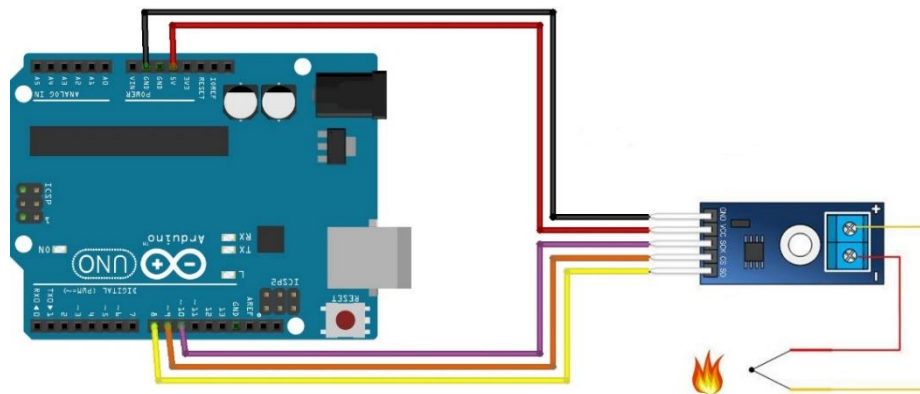


Figura 34 – Esquema de montagem do circuito (Fonte: www.circuitmagic.com/wp-content/uploads/2018/07/MAX6675-module-with-Arduino.jpg)

Para que o sensor seja reconhecido pela placa Arduino é necessário descarregar a biblioteca correspondente ao sensor de temperatura, que no caso do “MAX6675 K-Type Thermocouple Module” corresponde à biblioteca [max6675.h](https://github.com/RobTillaart/1-Wire-thermocouple).

Assim, o código que permite a conexão e receção de dados provenientes da Caldeira é o que se apresenta na Figura 35.

```
programa_UNO
#include <max6675.h>

int ktcSo = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSo);

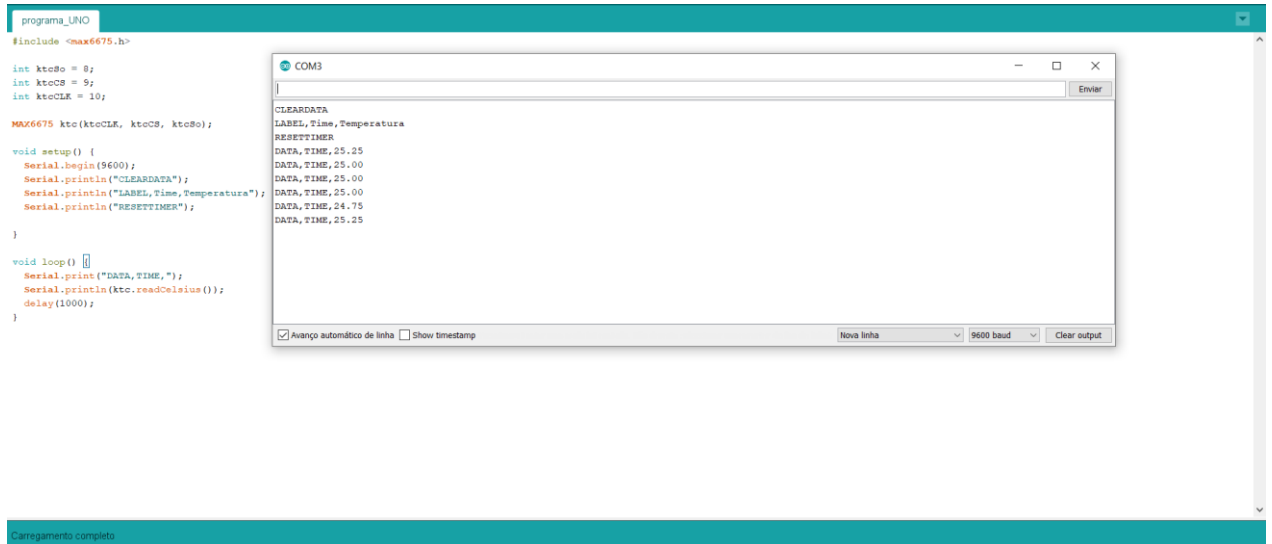
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,Temperatura");
  Serial.println("RESETTIMER");
}

void loop() {
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.println(ktc.readCelsius());
  delay(1000);
}
```

Figura 35 - Código para obtenção de dados do Sensor

Ao fornecer este código à placa de Arduino inicia-se a obtenção de dados provenientes do sensor de temperatura. Para aceder a estes dados impõe-se duas hipóteses:

a. Através do Serial Monitor presente no Arduino IDE;



Apesar da facilidade de acesso aos dados fornecidos por esta ferramenta do Arduino IDE, esta não permite guardar registo para posterior tratamento.

b. Através do Software PLX-DAQ (Parallax Data Acquisition tool)

O *Parallax Data Acquisition Tool* é um software que funciona como *add-in* para o Microsoft Excel. Consegue obter até 26 canais de dados recolhidos por microcontroladores e permite organizar os números em tabelas e gráficos que facilitam a análise e discussão.

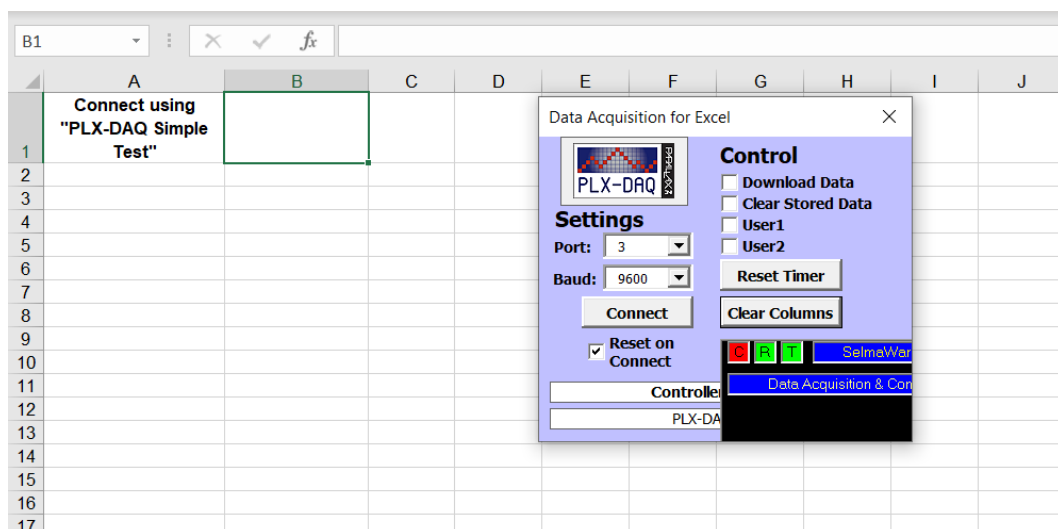


Figura 36 - PLX-DAQ

Para que o *software* reconheça os dados recolhidos é necessário que no código fornecido à placa de Arduino estejam incluídos comandos como:

- LABEL: Que define os títulos para cada uma das colunas.
- DATE, TIME: Permite que a porta do computador onde se encontra ligado a placa de Arduino envie os dados para Excel.

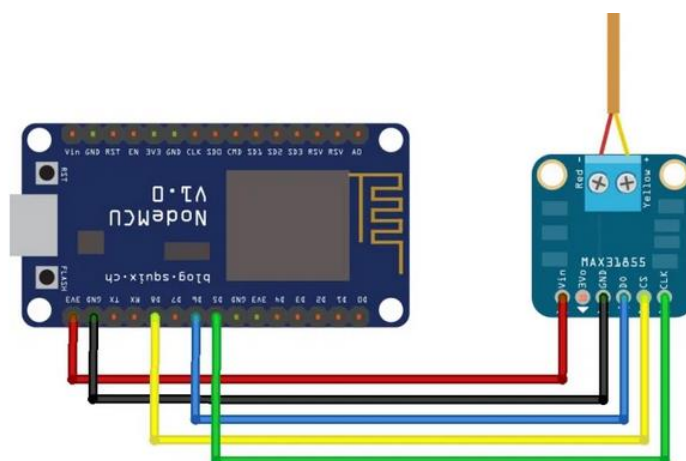
Estes comandos estão presentes no código concebido para este projeto:

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  Serial.println("CLEARDATA");  
  Serial.println("LABEL,Time,Temperatura");  
  Serial.println("RESETTIMER");  
}  
  
void loop() {  
  Serial.print("DATA,TIME,");  
  Serial.println(ktc.readCelsius());  
  delay(1000);  
}
```

Ligação entre o módulo WiFi ESP8266 e o Sensor de Temperatura

Apresenta-se na Figura 37, o esquema de ligação entre o sensor de temperatura e a o módulo WiFi ESP8266.

O objetivo desta montagem é a transmissão remota da temperatura da caldeira para qualquer aparelho que se encontre ligado ao WiFi da fábrica.



Apesar de, no que se refere à programação do sensor o código se assemelhar bastante aos códigos apresentados anteriormente, é necessário adicionar a componente que garante a transmissão dos dados para um *Webserver*. O código completo apresenta-se no Anexo 2 devido à extensão do mesmo. Destaca-se apenas um pormenor do código relevante para o utilizador (Figura 38).

```
const char* ssid = "Nome_da_rede"; // Colocar SSID da Rede
const char* password = "Pass"; //Password
```

Figura 38 – Código para programação do sensor

Nesta secção o utilizador deve introduzir as credenciais da rede a que pretende que o módulo WiFi se conecte e transmita os dados.

A secção do código responsável pela criação de uma página *Web* para colocação dos dados obtidos, foi adaptada de um projeto designado “*SI A5 Interfacing MAX6675 with ESP8266 and display Temperature data on the web server*”, disponível na Internet (VeeruSubbuAmi, 2020).

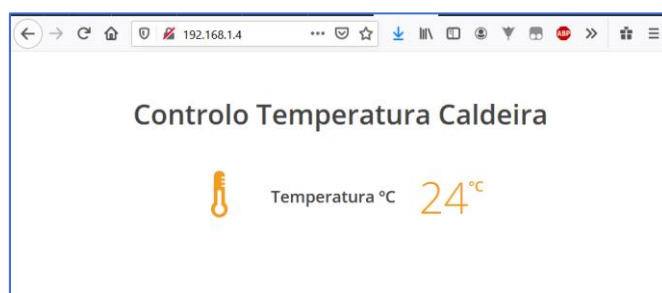


Figura 39 - Visualização dos dados

De forma a aceder aos dados transmitidos é necessário que o dispositivo eletrónico esteja conectado à mesma rede que o módulo *WiFi*. Ao colocar o IP fornecido pelo programa terá acesso a uma página (Figura 39) que mostra a temperatura detetada pelo sensor e que se atualiza sem a necessidade de realizar *refresh* na página.

3.3.3 Procedimento para Medição de Temperatura

Com o objetivo de avaliar e registar o comportamento da fornalha da caldeira, sempre que é necessário pôr a máquina a vapor a funcionar, foi instalado um sistema de aquisição de dados constituído pela placa Arduino e o sensor de temperatura.

O sensor foi colocado à entrada da fornalha de forma a evitar que a proximidade da chama adulterasse a medição e registasse uma temperatura demasiado elevada. Os resultados referentes à aquisição de temperatura com o sistema desenvolvido são apresentados na secção 4.3.

4. Monitorização de Condição na FPVM

Neste capítulo são apresentados os resultados e análise dos resultados obtidos na aplicação das técnicas descritas no procedimento: análise de vibrações, termografia e controlo de temperatura da caldeira. Destaca-se que a Fábrica da Pólvora já teve um trabalho ao nível do controlo de condição da estrutura do edifício central, abordado na secção 3.1.2. Este estudo apenas considerou a máquina a vapor como um elemento capaz de excitar a estrutura do edifício através do seu funcionamento. Neste trabalho, o funcionamento da máquina torna-se o elemento central do controlo de condição.

4.1 Análise e Interpretação dos Sinais Vibratórios

Após a recolha, os vários sinais foram convertidos para o formato .mat e guardados para posterior tratamento e análise. Esta conversão do formato do ficheiro justifica-se pela intenção de utilizar um software como o MATLAB ou o Octave para o tratamento dos dados. Apesar de terem sido recolhidos vários sinais, apenas são apresentados os que contribuem para a discussão de resultados.

Optou-se por começar a análise pelos resultados obtidos pelo acelerómetro 3 devido ao interesse inicial em determinar a velocidade de rotação do volante de inércia, que pode ser relacionada com os resultados obtidos pelos restantes acelerómetros.

A) Chumaceira Volante de Inércia



Figura 40 – a) Volante de Inércia b) Pormenor da Chumaceira (cm-seixal.pt)

De forma a simplificar a interpretação dos resultados obtidos, iniciou-se a análise pelos sinais obtidos pelo acelerómetro 3, colocado na chumaceira do volante de inércia (conforme Quadro 10), uma vez que será este registo que melhor permite estimar a velocidade de funcionamento da máquina, por apresentar um sinal com menos interferências de outros componentes.

Apesar da possibilidade de existirem interferências no sinal, admite-se que a frequência associada à velocidade de funcionamento da máquina seja dominante. Admite-se também que esta máquina, apesar de projetada para funcionar a 75 RPM, atualmente já não é colocada a funcionar à sua velocidade nominal, atingindo valores mais baixos. Considerando a conversão de 75 RPM para Hertz obtém-se 1,25 Hz para a frequência máxima de funcionamento. Este valor fornece uma indicação relativamente à ordem de grandeza dos valores de frequência de funcionamento a pesquisar nos registos de vibrações obtidos, os quais deverão então ser inferiores a 1,25 Hz.

Apresenta-se na Figura 41, o espectro de frequências registado pelo acelerómetro 1 no primeiro registo de vibrações efetuado

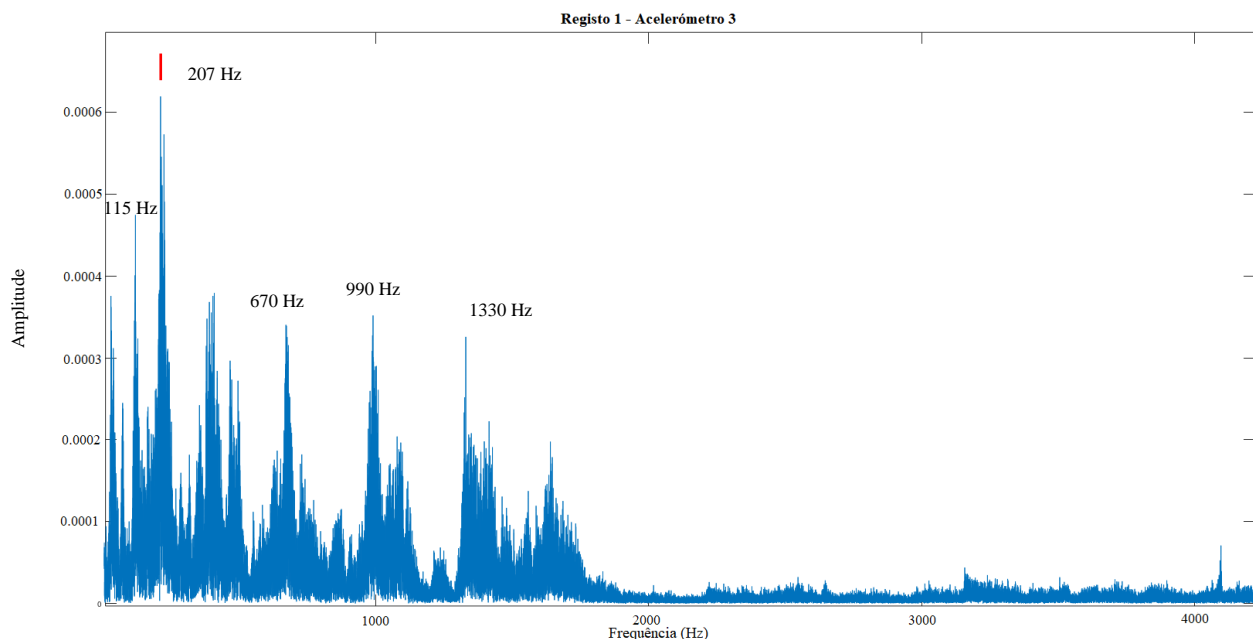


Figura 41 – Espectro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 3 (Chumaceira do Volante de Inércia)

Uma primeira análise do espectro permite verificar a existência de picos variando até aos 2000 Hz, apesar da frequência associada à velocidade de funcionamento estimada, como se referiu, ser inferior a 1,25 Hz. Estes picos estão associados a eventuais defeitos e harmónicas destes.

Utilizando a função de *zoom* do *software Octave*, torna-se possível aproximar o espectro para uma zona onde se pode situar a frequência de funcionamento investigada (Figura 42).

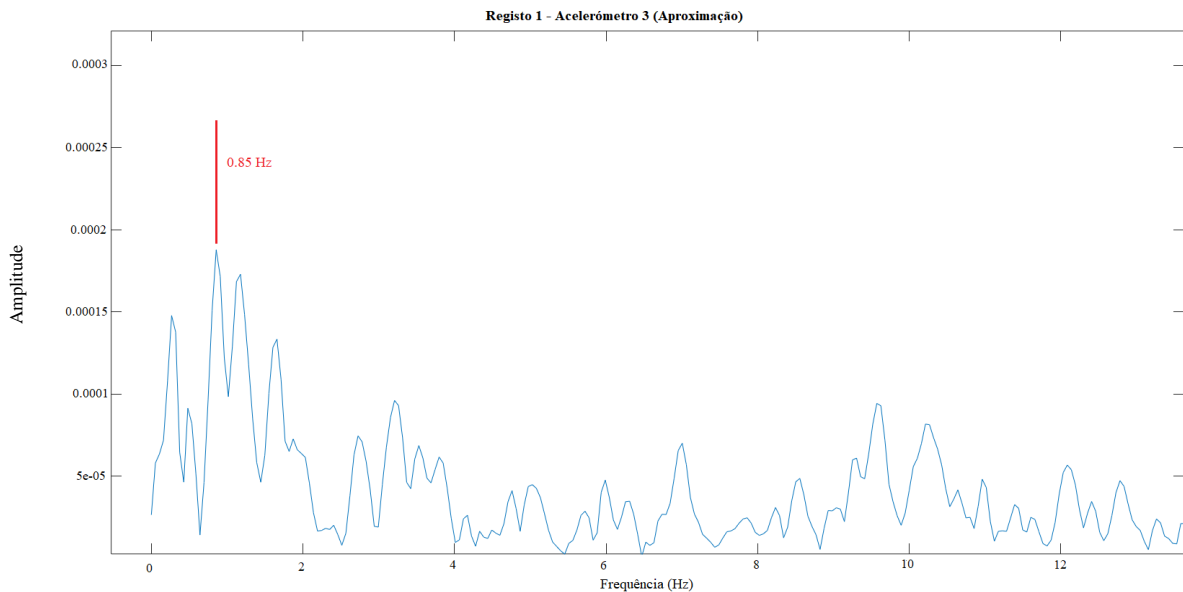


Figura 42 – Espectro de frequências do Registo 1 do acelerómetro 3 (ampliação do apresentado na Figura 41)

A ampliação feita no espectro, representado na Figura 42, tem como objetivo identificar uma frequência de funcionamento. Identifica-se um pico com uma amplitude relevante, ainda assim muito mais baixa do que as verificadas noutras zonas do espectro. A frequência de 0,85 Hz, convertida para rotações por minuto, resulta num valor de 51 RPM. Este valor é adequado para o que pode ser considerada uma velocidade de funcionamento. Contudo para validar esta hipótese, é importante verificar os restantes registos efetuados pelo mesmo acelerómetro (

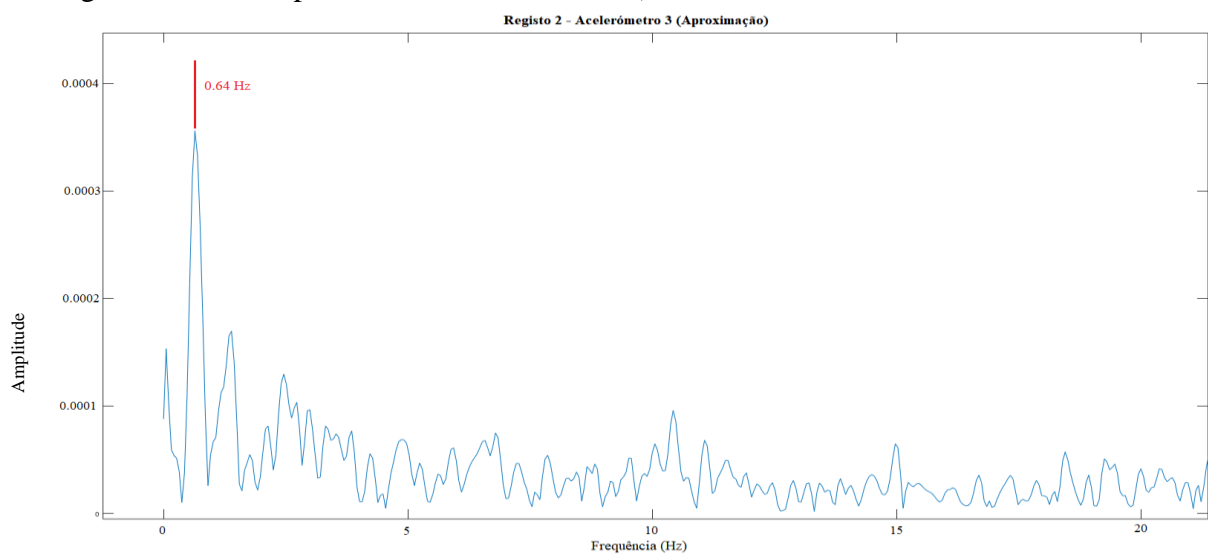


Figura 43 – Espectro de frequências do Registo 2 do acelerómetro 3 (ampliação)

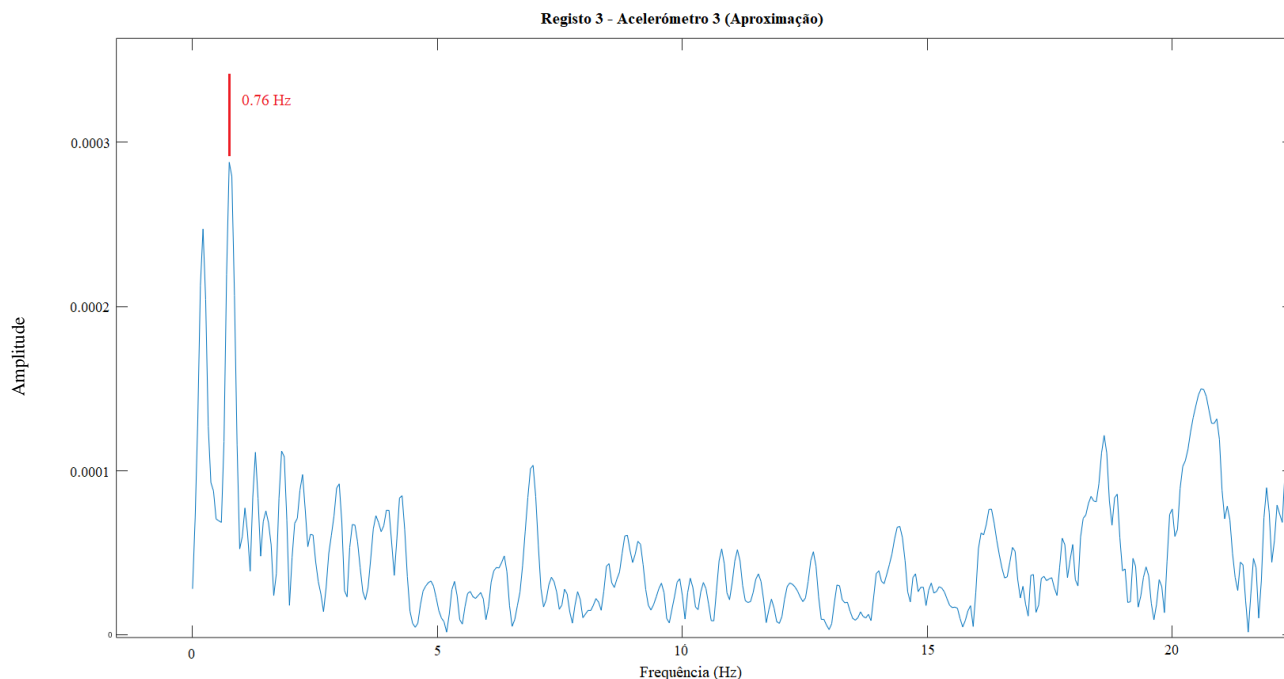


Figura 44 – Espectro de frequências do Registo 3 do acelerómetro 3 (ampliação)

Nos segundo e terceiro registos observam-se duas frequências próximas das observadas no Registo 1, 0,76 Hz e 0,64 Hz (45,6 RPM e 38,4 RPM, respetivamente).

A observação desta diferença entre os valores registados, vem suportar outro aspeto que foi observado *in loco* na fábrica, que diz respeito à flutuação da velocidade de funcionamento da máquina. A aceleração e desaceleração da máquina em pleno funcionamento é um dos maiores problemas no que se refere à aplicação de técnicas de controlo de condição, dado que a obtenção em condições diferentes dificulta a comparação entre os espectros obtidos, e consequentemente a análise e associação dos picos observados com os fenómenos eventualmente existentes no funcionamento.

A análise dos resultados permite também concluir que os acelerómetros piezoelétricos utilizados não são os ideais para a obtenção dos sinais de forma mais adequada. Estes acelerómetros captam facilmente vibrações com altas frequências mas têm dificuldade na recolha de baixas frequências. O facto da máquina e os seus componentes apresentarem baixas frequências de funcionamento, leva por esta razão a que a interpretação dos espectros seja mais complicada. Por exemplo para o espectro em que se detetava uma frequência de funcionamento de 0,85 Hz, correspondente a 51 RPM,

torna-se difícil marcar harmônicas desta frequência dado o baixo valor, apresentando-se o gráfico na Figura 45.

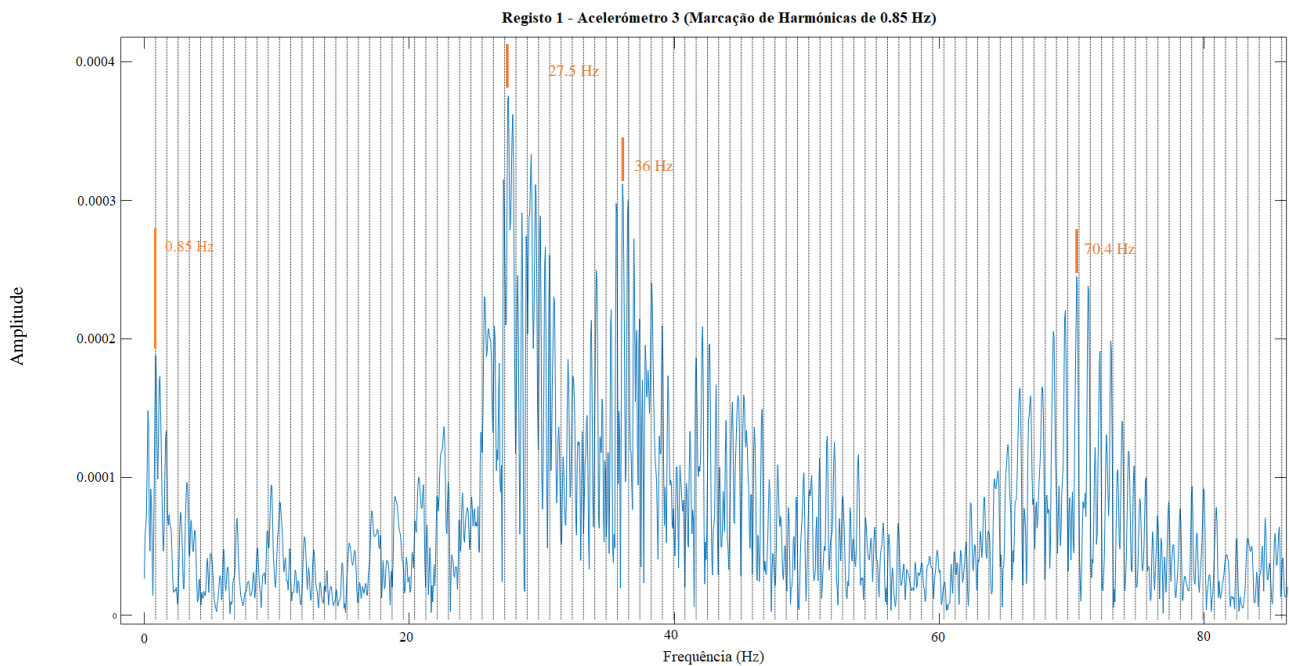


Figura 45 – Espectro de frequências do Registro 1 do acelerômetro 3 (harmônica de 0,85 Hz)

Apesar da grande maioria dos picos observados coincidirem com uma harmônica de 0,85 Hz, existe alguma dúvida dado o intervalo tão pequeno entre harmônicas. De forma a esclarecer esta situação, é relevante realizar testes adicionais com acelerômetros mais adequados a baixas frequências, ou seja com maior precisão.

B) Corpo da Bomba de Alimentação Principal

Uma primeira abordagem para estudar o funcionamento da bomba de alimentação principal, passa por estimar a velocidade de funcionamento da mesma.

O funcionamento da bomba é alimentado pelo funcionamento da máquina a vapor através de um sistema de transmissão por correias como o exemplificado na Figura 46.



Figura 46 – Sistema de transmissão por correias

No total, a transmissão de movimento é feita através de 1 volante e 4 polias até chegar à bomba. O volante, alimentado diretamente pela máquina a vapor, possui um diâmetro de 4,6 metros. A polia identificada na Figura 47 pelo nº2, alimentada pela correia, possui um diâmetro de 2,5 metros. Esta, por sua vez, proporciona a rotação de um veio que acciona a polia nº3, com diâmetro de 1 metro. Este mecanismo está demonstrado na Figura 51.

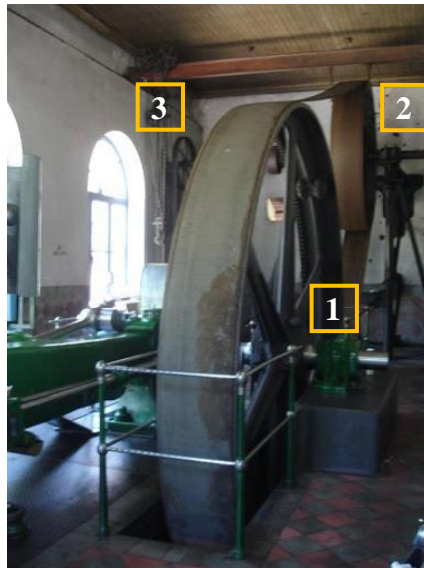


Figura 47 – Volante e polias

A transmissão continua para o andar onde se situa a bomba. Aqui estão presentes duas polias que darão continuidade à transmissão do movimento (Figura 48).

A existência de várias polias, tem dois objetivos principais: o primeiro passa por, como já referido anteriormente, transmitir o movimento à bomba para que esta possa funcionar. O segundo objetivo está relacionado com a multiplicação da velocidade de rotação. As polias possuem tamanhos variados para que a velocidade de rotação que chega à bomba seja a necessária para o seu funcionamento.

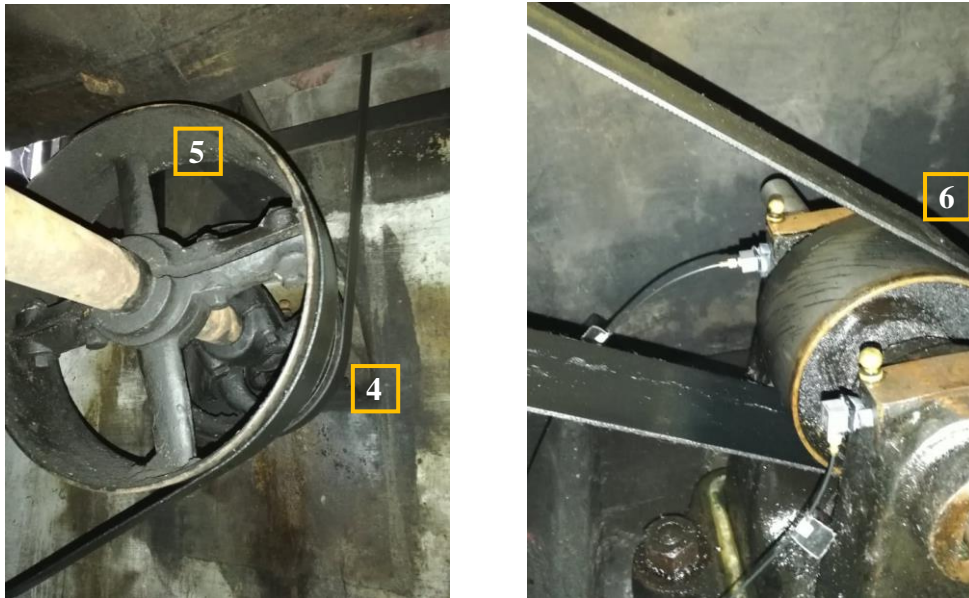


Figura 48 – a) Polias (4), (5) b) eixo rotativo da bomba (6)

O conhecimento da velocidade de rotação do Volante 1 e dos diâmetros das polias do sistema permite estimar uma velocidade de funcionamento da bomba.

$$r_1 = 2,3 \text{ m}; r_2 = 1,25 \text{ m}; r_3 = 0,5 \text{ m}; r_4 = 0,17 \text{ m}; r_5 = 0,2 \text{ m}; r_6 = 0,075 \text{ m}$$

$$1 \text{ RPM} = \frac{2\pi}{60}$$

assumindo uma velocidade de rotação de 75 RPM

$$\omega_1 = 7,852 \text{ Rad/s}$$

$$V_1 = V_2 \rightarrow r_1 \times \omega_1 = r_2 \times \omega_2 \rightarrow 2,3 \times 7,854 = 1,25 \times \omega_2 \rightarrow$$

$$\omega_2 = 14,45 \text{ Rad/s} = \omega_3$$

$$V_3 = V_4 \rightarrow r_3 \times \omega_3 = r_4 \times \omega_4 \rightarrow 0,5 \times 14,45 = 0,17 \times \omega_4 \rightarrow$$

$$\omega_4 = 42,5 \text{ Rad/s} = \omega_5$$

$$V_5 = V_6 \rightarrow r_5 \times \omega_5 = r_6 \times \omega_6 \rightarrow 0,2 \times 42,5 = 0,075 \times \omega_6 \rightarrow$$

$$\omega_6 = 113,33 \text{ Rad/s} = 1082 \text{ RPM}$$

Tendo-se constatado que a velocidade de funcionamento da máquina, apesar de variar ao longo do tempo, esta não atinge a sua velocidade nominal. Por forma a ter um valor de referência enquadrado com os dados recolhidos, realizaram-se os mesmos cálculos para a velocidade de funcionamento determinada pela análise do gráfico correspondente ao 1º Registo (Figura 42), sendo considerada a velocidade de funcionamento de 51 RPM (0.85 Hz):

assumindo uma velocidade de rotação de 51 RPM

$$w_1 = 5,34 \text{ Rad/s}$$

$$V_1 = V_2 \rightarrow r_1 \times w_1 = r_2 \times w_2 \rightarrow 2,3 \times 5,34 = 1,25 \times w_2 \rightarrow$$

$$w_2 = 9,8256 \text{ Rad/s} = w_3$$

$$V_3 = V_4 \rightarrow r_3 \times w_3 = r_4 \times w_4 \rightarrow 0,5 \times 9,8256 = 0,17 \times w_4 \rightarrow$$

$$w_4 = 28,9 \text{ Rad/s} = w_5$$

$$V_5 = V_6 \rightarrow r_5 \times w_5 = r_6 \times w_6 \rightarrow 0,2 \times 28,9 = 0,075 \times w_6 \rightarrow$$

$$w_6 = 77,1 \text{ Rad/s} = 736 \text{ RPM}$$

Os acelerómetros foram colocados na bomba de alimentação principal, com a disposição que se apresenta na Figura 49 (ver Quadro 10). Os acelerómetros 2 e 3 foram colocados nos apoios da bomba, efetuando medições na direção radial, enquanto que o acelerómetro 1 foi colocado no corpo da bomba, estando a medir na direção axial.

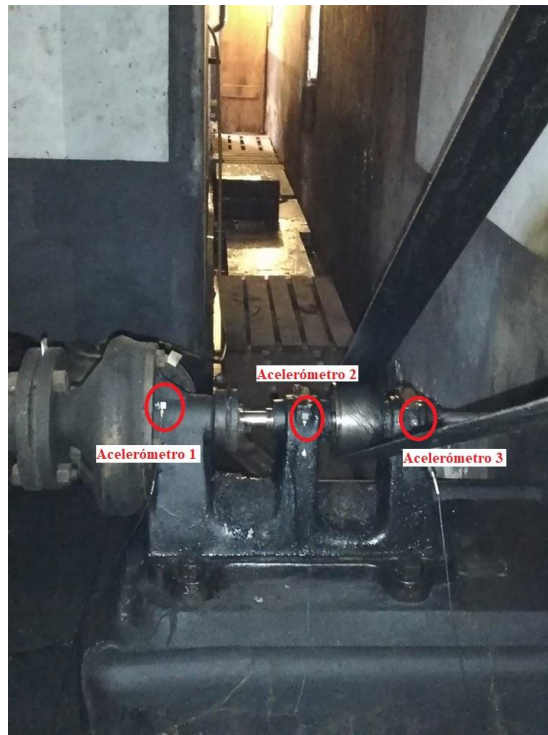


Figura 49 –Localização dos acelerómetros na bomba de alimentação principal

O registo de sinal executado pelo acelerómetro 1 corresponde ao corpo da bomba é apresentado na Figura 50.

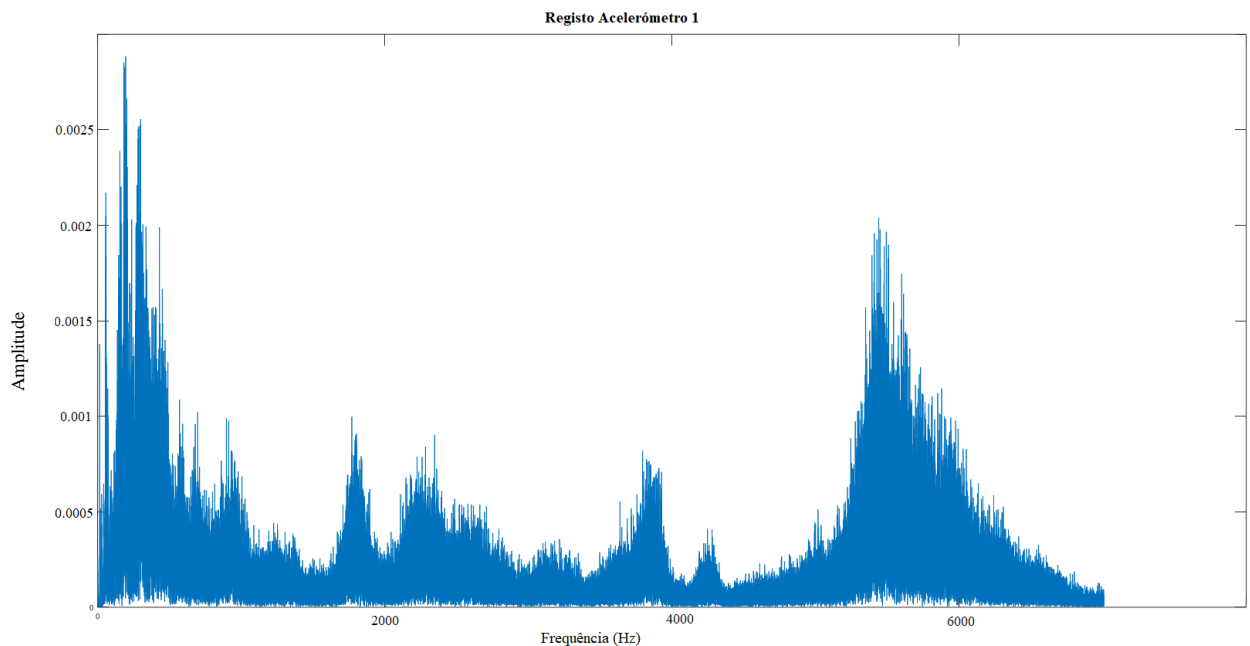


Figura 50 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (Corpo da bomba)

Fazendo uma ampliação ao espectro na zona de interesse torna-se possível encontrar amplitudes em frequências próximas da estimada para o funcionamento da bomba (Figura 51).

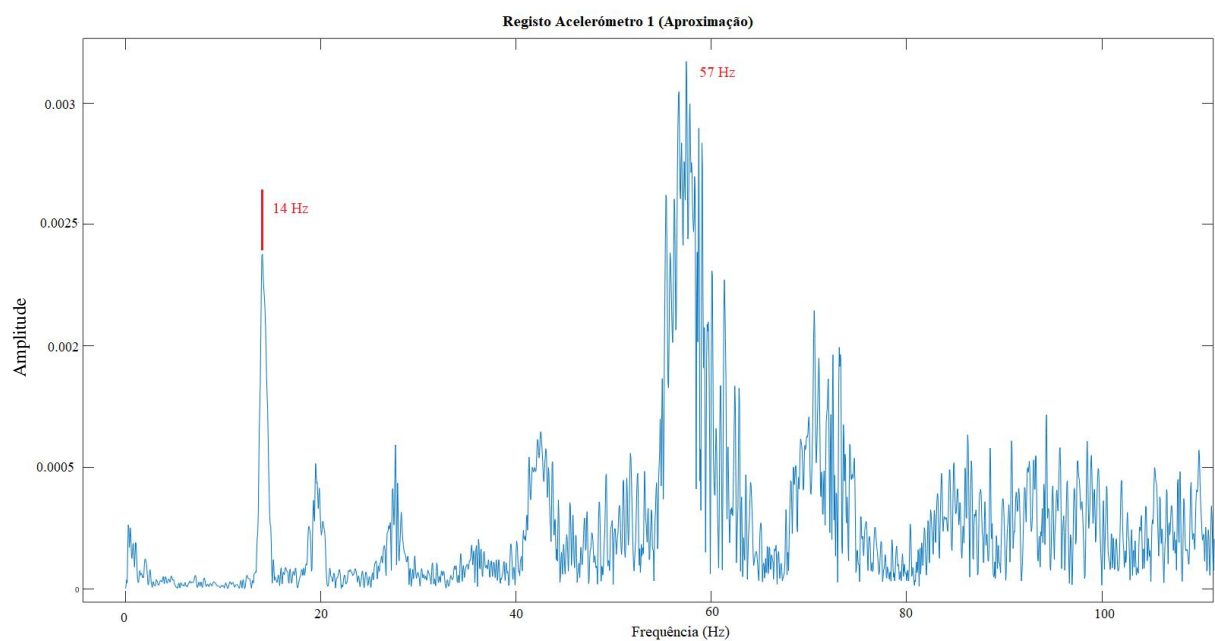


Figura 51 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (ampliação)

A frequência de 14 Hz identificada corresponde a uma velocidade de funcionamento da bomba de 840 RPM, valor próximo dos 736 RPM calculado acima para uma velocidade de funcionamento da máquina de 51 RPM. Efetuando os cálculos de forma inversa, para uma velocidade de funcionamento da bomba de 840 RPM implica uma velocidade de funcionamento da máquina de 58 RPM. Volta-se a observar as flutuações da velocidade de funcionamento da máquina. Na Figura 51 verifica-se também a presença de um pico com amplitude elevada numa frequência correspondente à quarta harmónica da frequência de funcionamento.

Na Figura 52 apresentam-se as harmónicas da frequência de 14 Hz. Importa destacar a coincidência de parte dos picos identificados, com os múltiplos desta frequência.

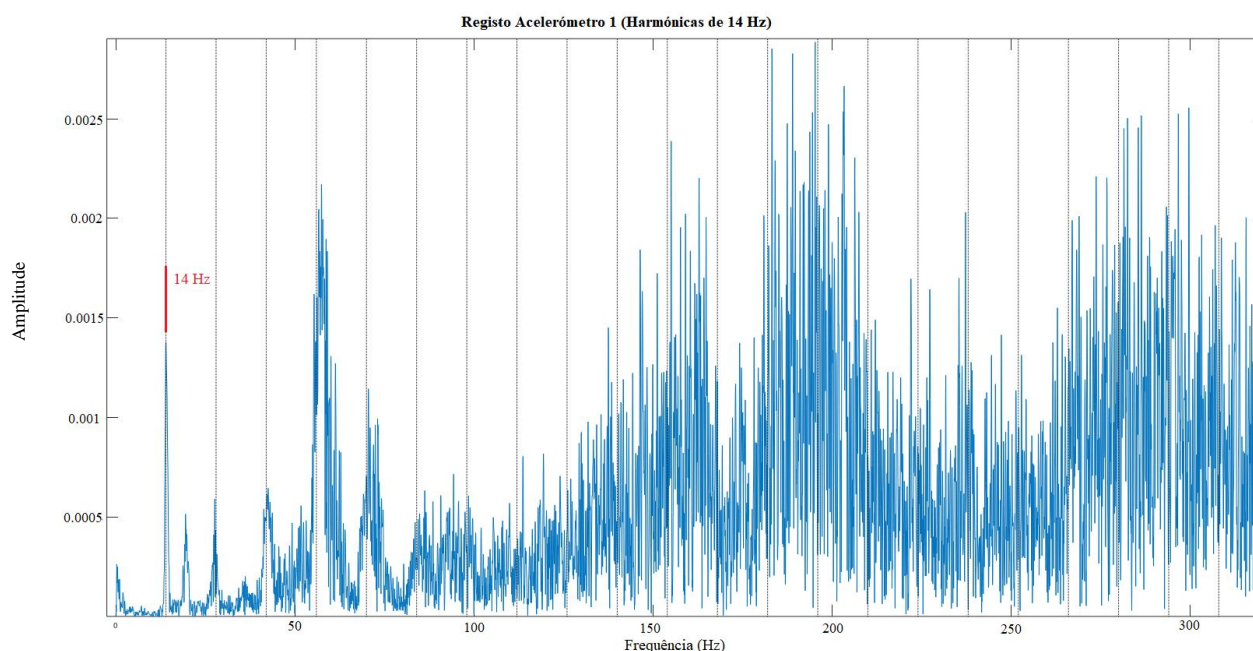


Figura 52 – Espectro frequências do sinal registado pelo acelerómetro 1 (harmónicas 14 Hz)

Esta amplitude correspondente à frequência de 14 Hz surge também no espectro de frequências registados obtidos pelos acelerómetros 2 e 3 (Figura 53 e Figura 54).

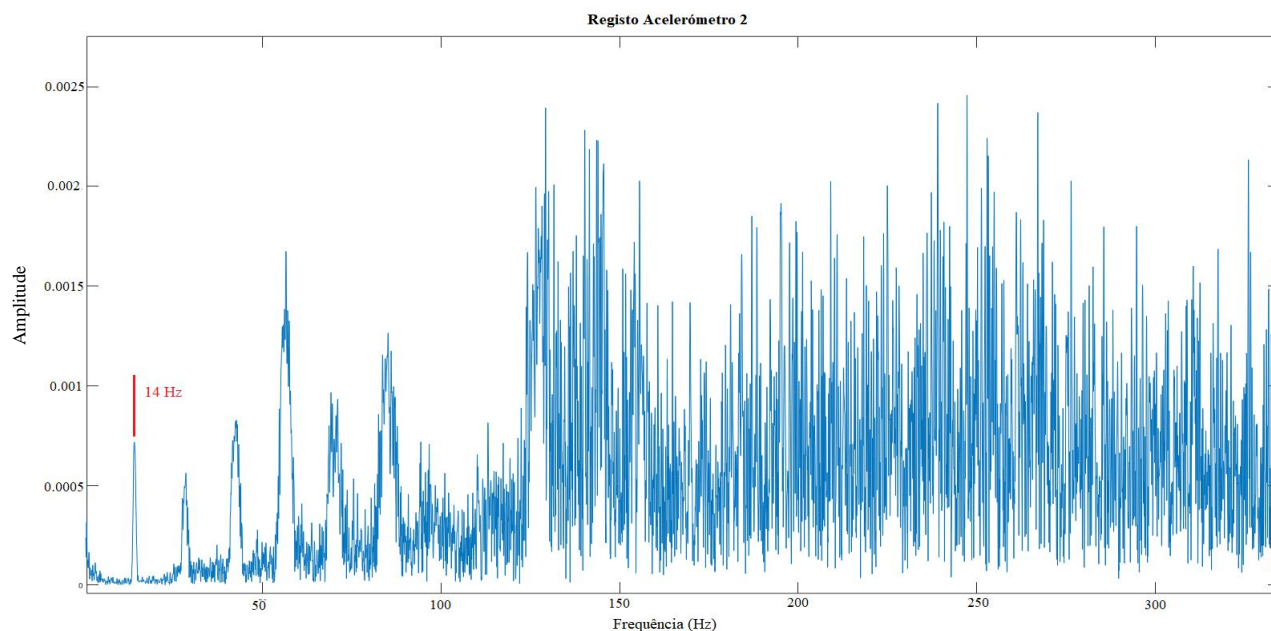


Figura 53 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 2 (harmónicas 14 Hz)

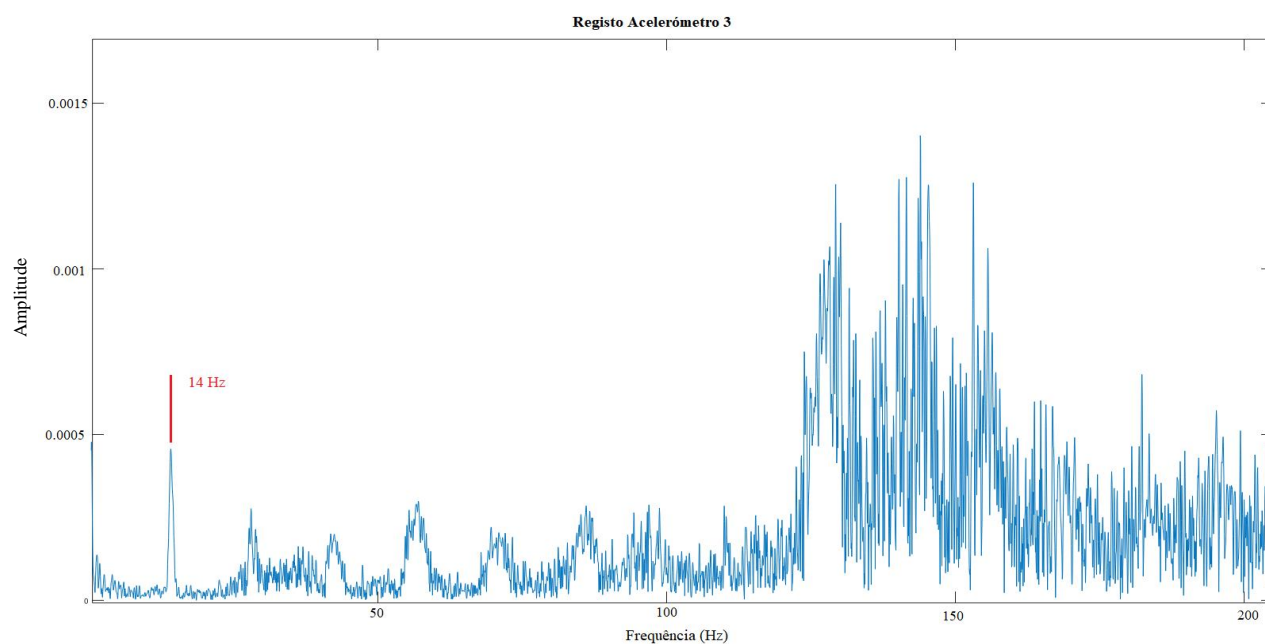


Figura 54 – Espectro de frequências do sinal registado pelo acelerómetro 3 (harmónicas 14 Hz)

A existência de um pico constante associado à frequência de 14 Hz e a existência de picos em harmónicas deste valor são indicadores que permitem associar os fenómenos à frequência de funcionamento do equipamento. Estes sinais vibratórios, sendo dependentes da velocidade de funcionamento da máquina a vapor, também terão o seu conteúdo afetado.

Fenómeno de Cavitação

A presença de um possível fenómeno de cavitação identifica-se, como já abordado anteriormente (Figura 20), quando é detetada uma gama de frequências onde os picos não estão bem definidos, existindo uma variação aleatória da amplitude nessa gama. Através da análise do espetro Figura 55, nomeadamente da zona identificada a vermelho, é possível indicar a presença de cavitação, não conseguindo identificar a sua intensidade. Torna-se necessário a realização de mais estudos no sentido de aprofundar esta questão.

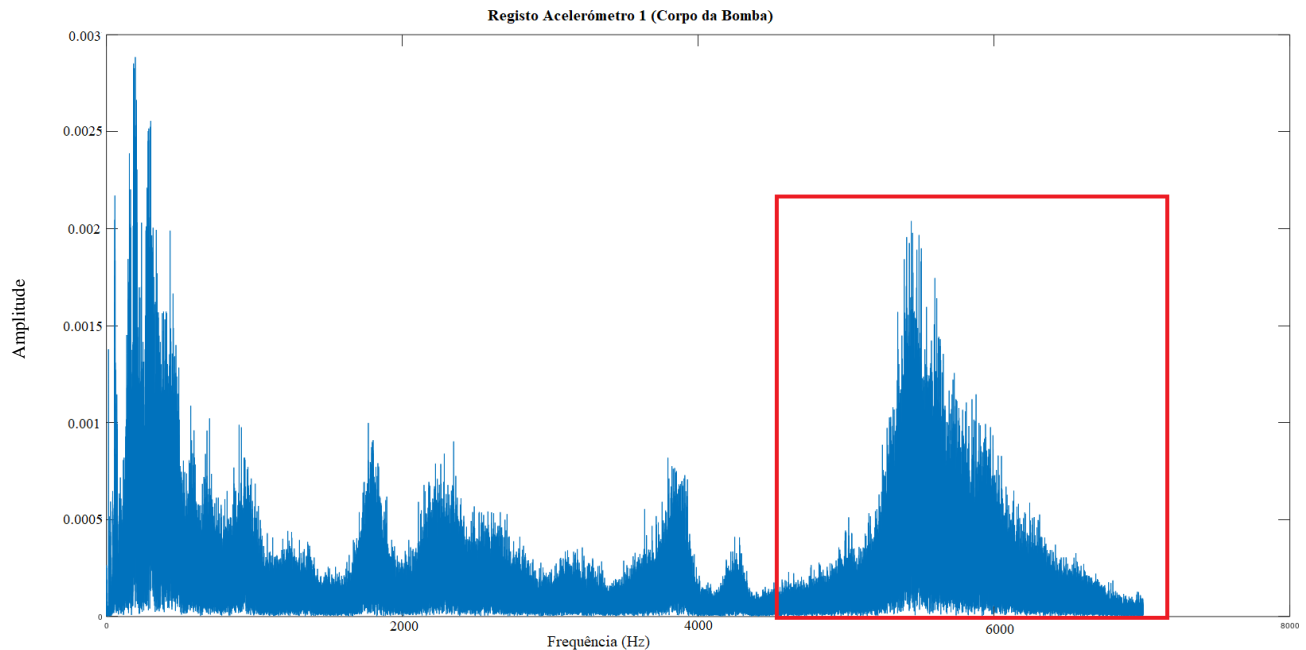


Figura 55 – Espetro de frequências do sinal do acelerómetro 1 (eventual fenómeno de cavitação)

No espetro de frequências do Registo 2 (Figura 56) voltam a surgir as mesmas amplitudes em frequência elevadas, com características que também aparentam ser pouco aleatórias.

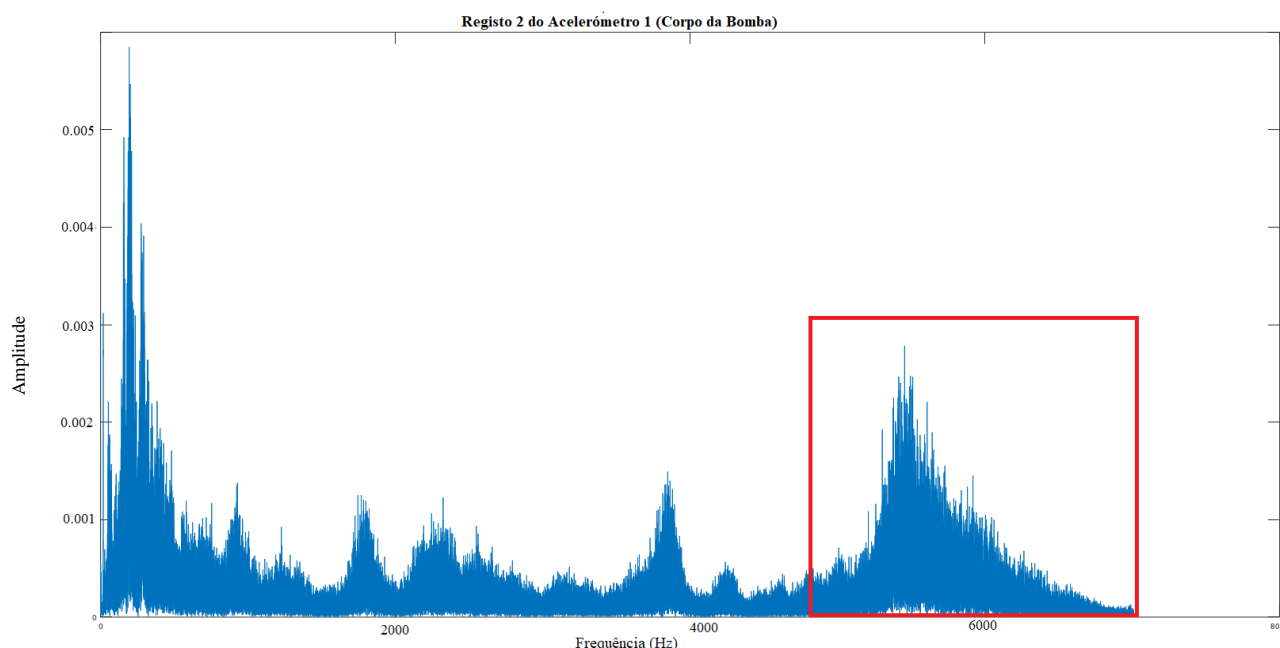


Figura 56 – Espectro frequências registo 2 do acelerómetro 1 (eventual fenómeno de cavitação)

Esta bomba de água é de facto um elemento relevante para o estudo do funcionamento geral da máquina. Para a deteção eficaz de falhas seria necessária uma análise mais aprofundada ao nível da constituição da bomba, de forma a conhecer, por exemplo, a frequência de passagem das pás ou a possível existência de fugas entre o estator e o rotor. Esta será uma das prioridades para trabalhos futuros.

A possível existência de um fenómeno de cavitação pode levar à destruição das pás da bomba, prejudicando gravemente o funcionamento, podendo mesmo conduzir à sua inutilização. De realçar, portanto, a importância de uma investigação mais aprofundada deste ponto de modo prevenir possíveis danos.

Defeitos nos Rolamentos da Bomba

Os acelerómetros 2 e 3 foram colocados junto aos rolamentos de escorregamento da bomba. Para os rolamentos de escorregamento apresentados podem-se identificar dois tipos de defeitos: folgas elevadas e o fenómeno de *Dry Whirl*.

Como já foi abordado anteriormente, um padrão típico que permite detetar a presença de folgas elevadas apresentou-se anteriormente na Figura 23, a qual se sobrepôs na Figura 57 para melhor explicitação da observação.

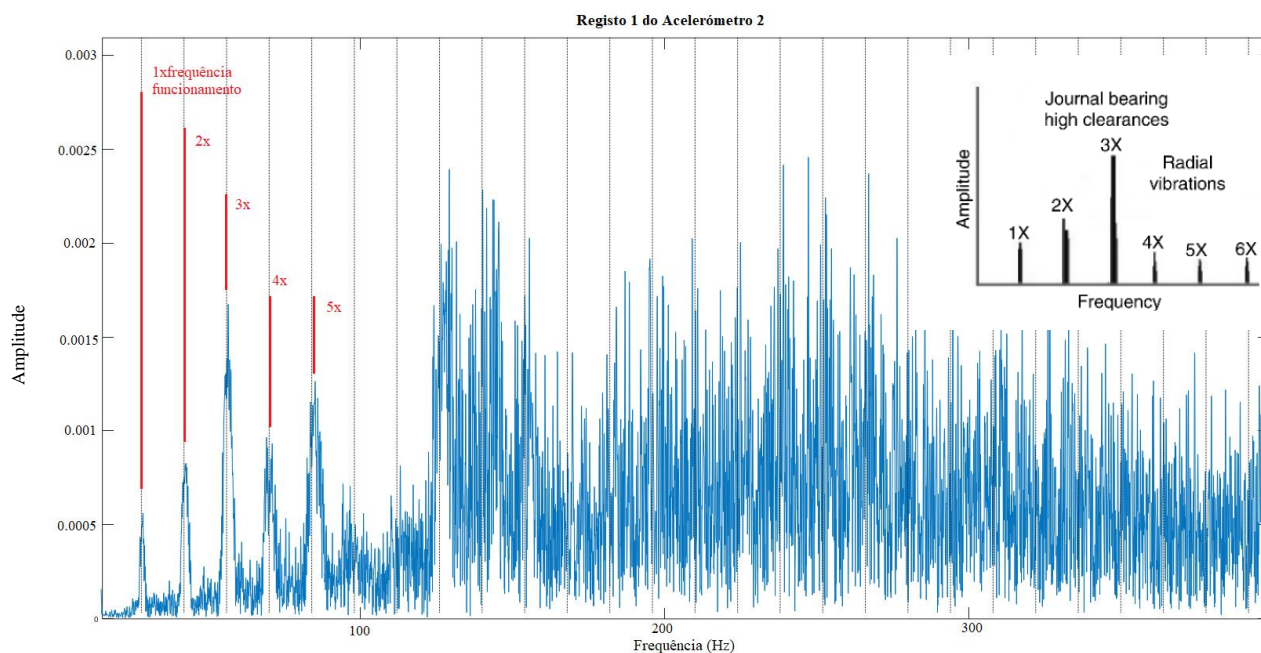


Figura 57 – Espectro de frequências do Registro 2 do acelerômetro 2 (Rolamentos escorregamento)

No sinal recolhido pelo acelerômetro 2 surge um padrão muito semelhante ao da Figura 23 (sobreposta no gráfico). O espectro da Figura 57 é aqui repetido para análise deste fenómeno. Trata-se de uma evidência que levanta a necessidade de investigar mais profundamente a possível presença deste defeito. O mesmo padrão já não surge no sinal do acelerômetro 3, como se verifica na Figura 58.

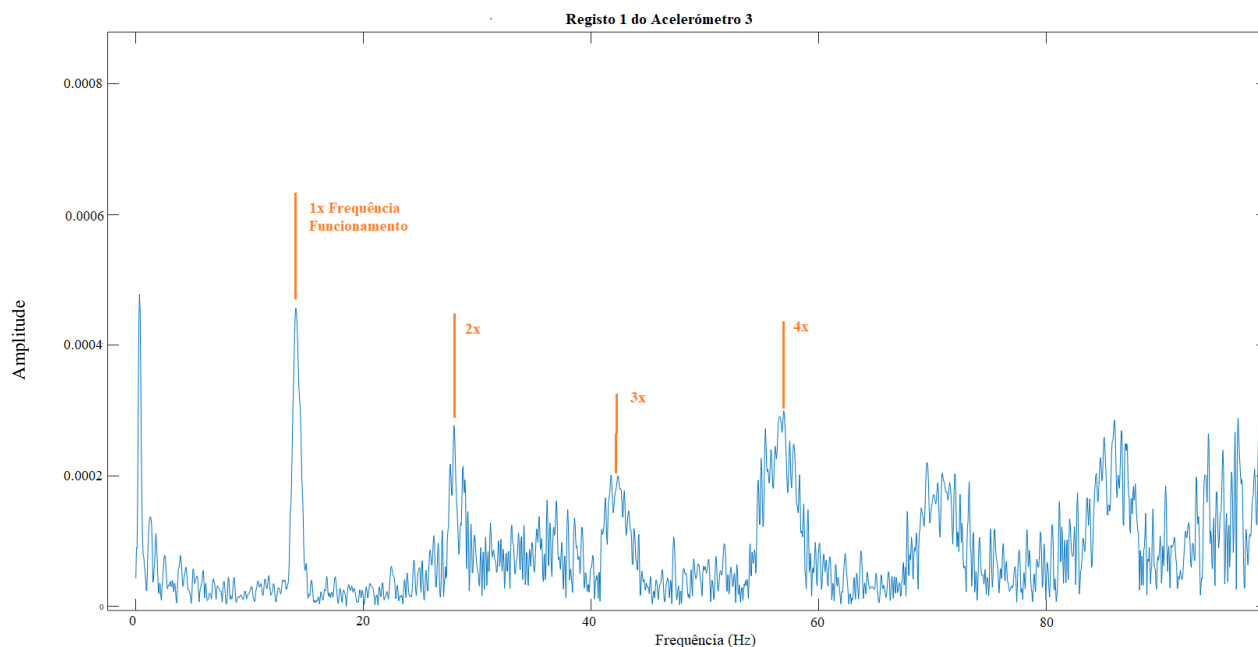


Figura 58 – Espectro de frequências do Registro 1 do acelerômetro 2 (Rolamentos escorregamento)

Verifica-se portanto que apenas um dos rolamentos de escorregamento, apresenta indicadores da existência de folgas elevadas. Apenas um estudo futuro com mais detalhe da bomba poderá confirmar a veracidade destes factos.

C) Corpo da Máquina a Vapor – Acelerómetro 2

De forma a facilitar o entendimento dos resultados obtidos no acelerómetro 2 (ver Quadro 10), importa compreender as interações e movimentos que ocorrem neste objeto.

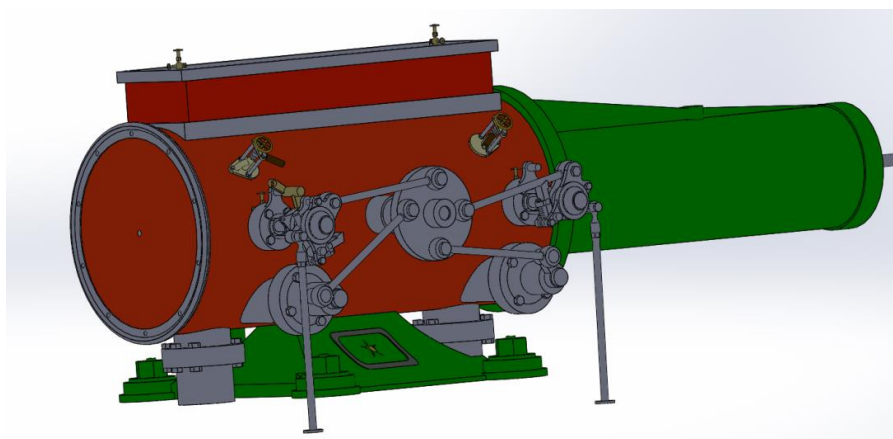


Figura 59 – Modelação corpo da máquina efetuada por (Santos, 2020.)

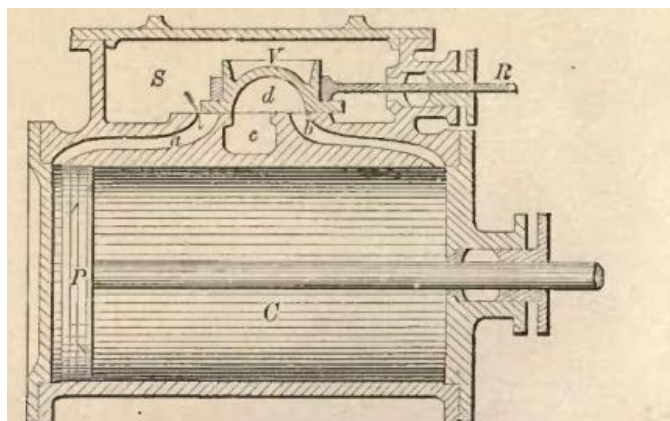


Figura 60 – Representação esquemática do interior de uma máquina vapor (Filipe, et al., 2012)

Pela observação das Figura 59 e Figura 60 imediatamente se conclui que existem vários componentes cujo movimento pode ser detetado no controlo da vibração. Este facto torna mais complexa a análise dos gráficos devido ao ruído gerado.

Antes de qualquer análise pode-se assumir alguns pontos de base que podem ajudar na compreensão dos espetros:

1. Segundo a certificação a máquina, em condições de funcionamento normais, consegue fornecer ao volante de inércia uma rotação de 75 RPM;

2. Para que uma rotação completa aconteça, o pistão executa um movimento de avanço e recuo.
3. O componente, que na Figura 60 aparece identificado pela letra V, é responsável pela circulação de vapor no interior da máquina (controla a entrada e saída de vapor do cilindro). Espera-se que o movimento deste componente apareça no espectro apesar das dúvidas em relação às frequências em que surge.

No entanto, é importante também destacar que o desenho técnico da Figura 60 não corresponde ao desenho da máquina do caso de estudo, acredita-se apenas que o funcionamento seja bastante semelhante, embora não haja certezas. Sendo a admissão de vapor um facto extremamente relevante para o estudo da máquina, tem-se recorrido a outro tipo de exames, mais concretamente a radiografia, no intuito de compreender melhor como se processa este fenómeno.

Podem esperar-se amplitudes em frequências relacionadas com alguns dos movimentos principais que ocorrem: o avanço e recuo do pistão, diretamente relacionado com a velocidade de funcionamento da máquina e o movimento do controlador de entrada e saída de vapor.

Para que o sistema complete uma rotação, o pistão executa dois movimentos, um de avanço e outro de recuo. Assim, se por exemplo a máquina encontrar a funcionar a 75 RPM, significa que em 1 minuto o pistão executará 150 movimentos, ou seja, 150 ciclos por minuto. Esta análise permitirá apontar a ordem de grandeza das frequências a pesquisar no espectro.

O controlo da entrada e saída de vapor, é efetuado por uma peça que tem o seu movimento alimentado pelo veio excêntrico.

Além disso, poderão ainda existir no espectro registado, frequências relacionadas com o funcionamento de outros componentes como o veio excêntrico, a biela-manivela ou até mesmo da rotação do volante de inércia. Acresce ainda, a possibilidade de existirem sinais relacionados com o próprio movimento do vapor, capaz de gerar ruído no espectro.

O espectro apresentado na Figura 61 corresponde a um sinal recolhido durante o Registo 1, o mesmo registo em que se identificou a velocidade de rotação do volante de inércia de 51 RPM, correspondente a 0,85 Hz.

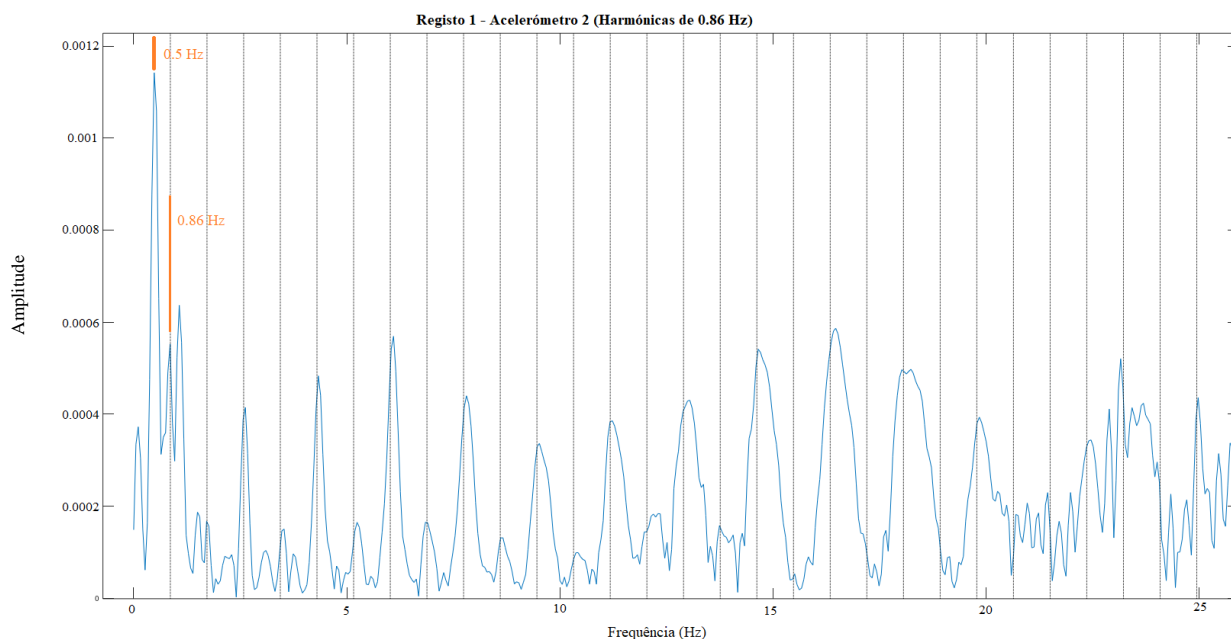


Figura 61 - Espectro de frequências do registo 1 do acelerómetro 2 (Harmónicas de 0,86 Hz)

O primeiro pico identificado no espectro corresponde a uma frequência de 0,5 Hz, aproximadamente 30 CPM. Aqui referimos ciclos por minuto (CPM) em vez de RPM devido ao facto de estarmos a abordar o funcionamento alternativo da máquina a vapor. Dada a informação recolhida, não possuímos explicação para a existência deste pico a esta frequência.

A frequência de 0,86 Hz corresponde a 51,6 CPM. Este valor de velocidade de funcionamento coincide com a velocidade de funcionamento do volante de inércia que foi identificado no registo 1. Dado o movimento alternativo do pistão, o sinal esperado corresponde a uma onda quadrada, cujas harmónicas ímpares da frequência de funcionamento apresentam elevada amplitude e as pares são inexistentes. Este facto verifica-se no espectro da Figura 61 para a frequência de 0.86 Hz. No entanto surgem também picos correspondentes às harmónicas pares. Isto acontece pelo simples motivo de não possuímos uma onda quadrada pura.

Isto permite-nos apontar para a frequência de 0.86 Hz como sendo a frequência de funcionamento do pistão. **Figura 61**

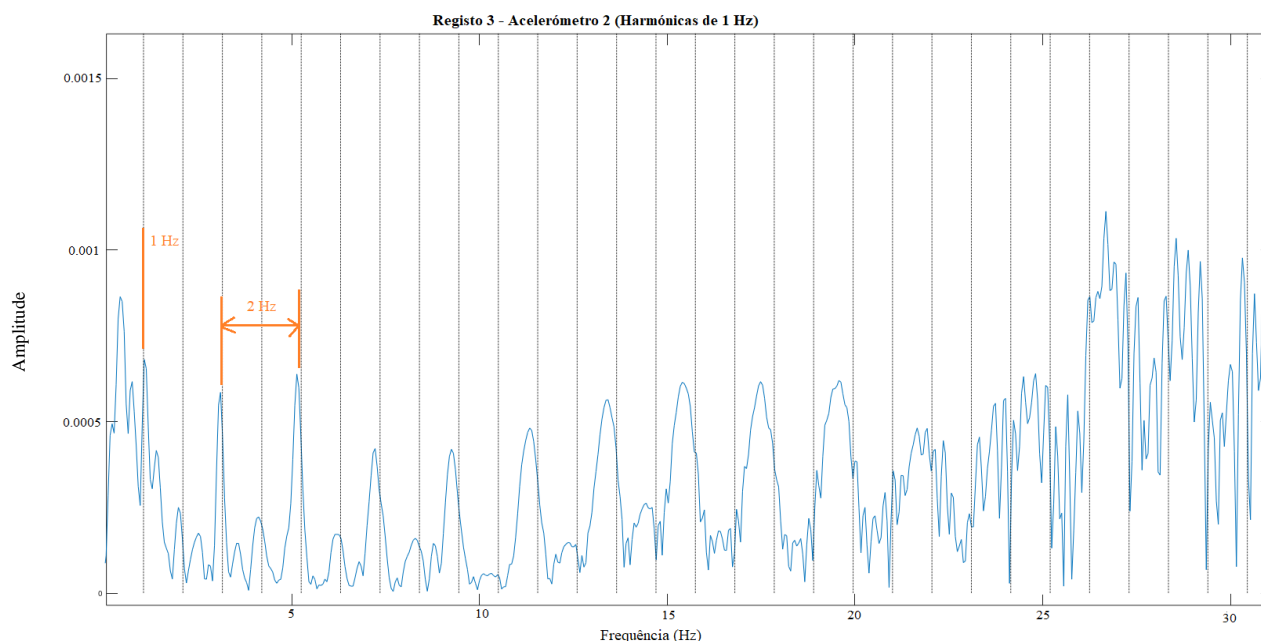


Figura 62 - Espectro de frequências do registo 3 do acelerómetro 2 (Harmónicas de 1 Hz)

O mesmo raciocínio pode ser seguido para o espectro registado na Figura 62, correspondente ao registo 3 do acelerómetro 2. Neste registo foi apontada uma frequência de funcionamento de 0.76 Hz para o volante de inércia.

A frequência de 1 Hz, marcada no espectro corresponde a 60 CPM. Tal como para o espectro da Figura 62, marcando as harmónicas de 1 Hz volta-se a verificar os picos com amplitudes mais elevadas nas harmónicas ímpares desta frequência. Este facto, tal como anteriormente, leva-nos a apontar a frequência de 1 Hz como a frequência de funcionamento do pistão.

A diferença de frequências de funcionamento entre o registo 1 e o registo 3 vem provar mais uma vez a existência de flutuações na velocidade de funcionamento da máquina.

D) Veio Excêntrico

Na Figura 63 está apresentado o espectro correspondente ao primeiro registo obtido pelo acelerómetro 1 colocado num apoio do veio excêntrico (Registo 1). Mais uma vez observam-se picos em frequências bastante elevadas, face à baixa velocidade de funcionamento da máquina. Torna-se necessário aproximar estes espectros para valores de frequência que se possam relacionar diretamente com funcionamento da máquina.

Interpretando isto de um ponto de vista do funcionamento da máquina, o veio excêntrico é responsável pelo movimento da válvula que controla a entrada e saída de vapor do êmbolo (admitindo que é o movimento do veio que define o movimento do pistão, tal como os espectros em análise apontam).

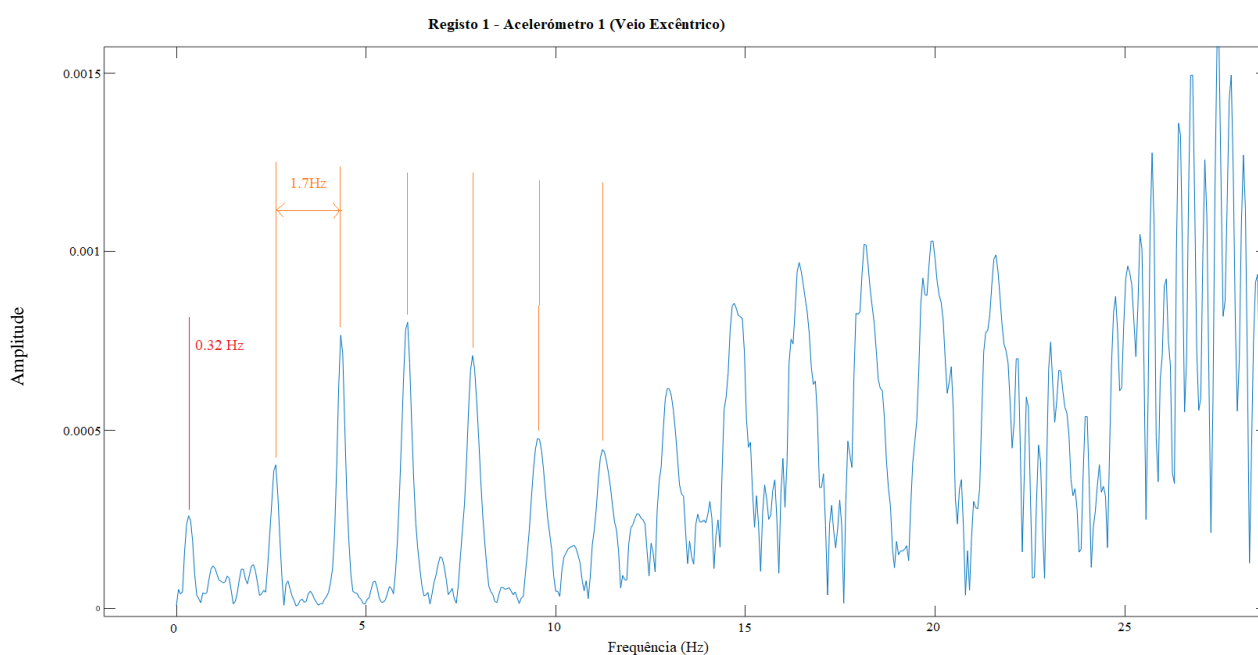


Figura 63 - Espectro de frequências do registo 1 do acelerómetro 1 (Veio excêntrico)

O mesmo facto volta a observar-se no terceiro registo (Figura 64). Neste registo volta a surgir a frequência de 1 Hz, tal como havia acontecido no mesmo registo para os acelerómetros do corpo da bomba e da chumaceira do volante de inércia. A existência de harmónicas desta frequência leva-nos a apontar para uma frequência de funcionamento, estabelecendo-se assim uma ligação dinâmica entre o movimento do pistão, o movimento do veio excêntrico e a rotação do volante de inércia.

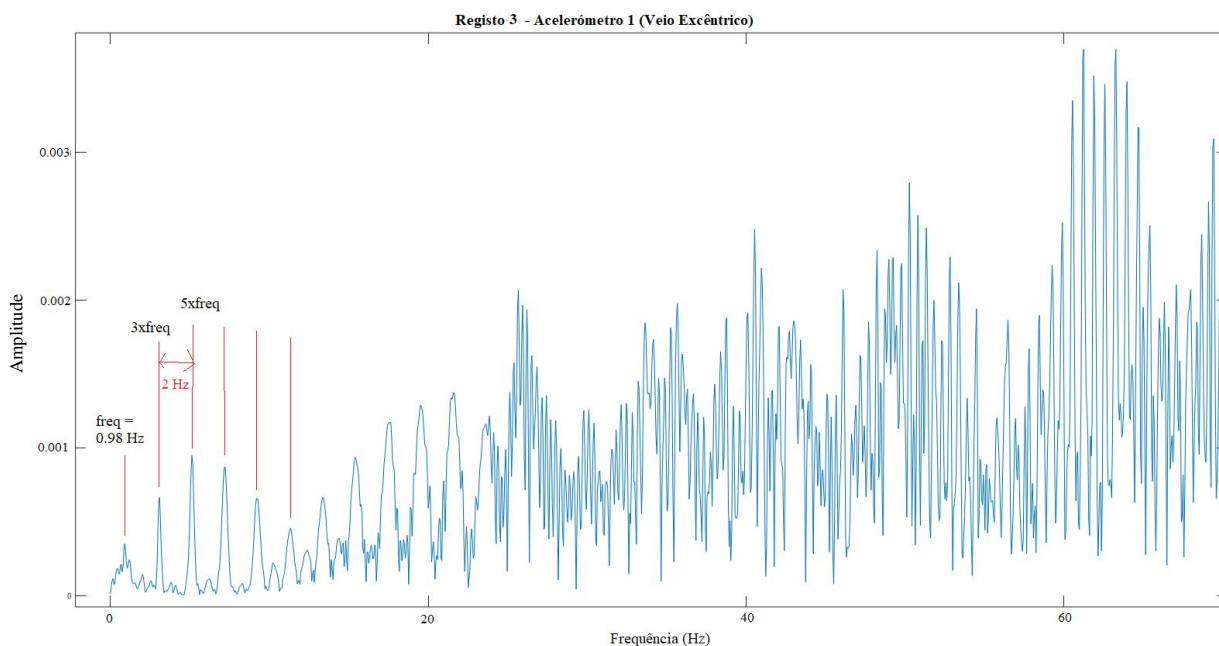


Figura 64 - Espectro de frequências do registro 3 do acelerômetro 1 (Veio excêntrico)

O espectro correspondente ao segundo registro do acelerômetro 1 (Figura 65) dificulta bastante a sua interpretação, tal como já havia acontecido para o segundo registro do acelerômetro 2. É possível que este registro tenha sido realizado durante um momento mais instável do funcionamento da máquina, em que a velocidade dos componentes terá oscilado, dificultando ainda mais a obtenção de um sinal capaz de produzir um espectro adequado a interpretação.

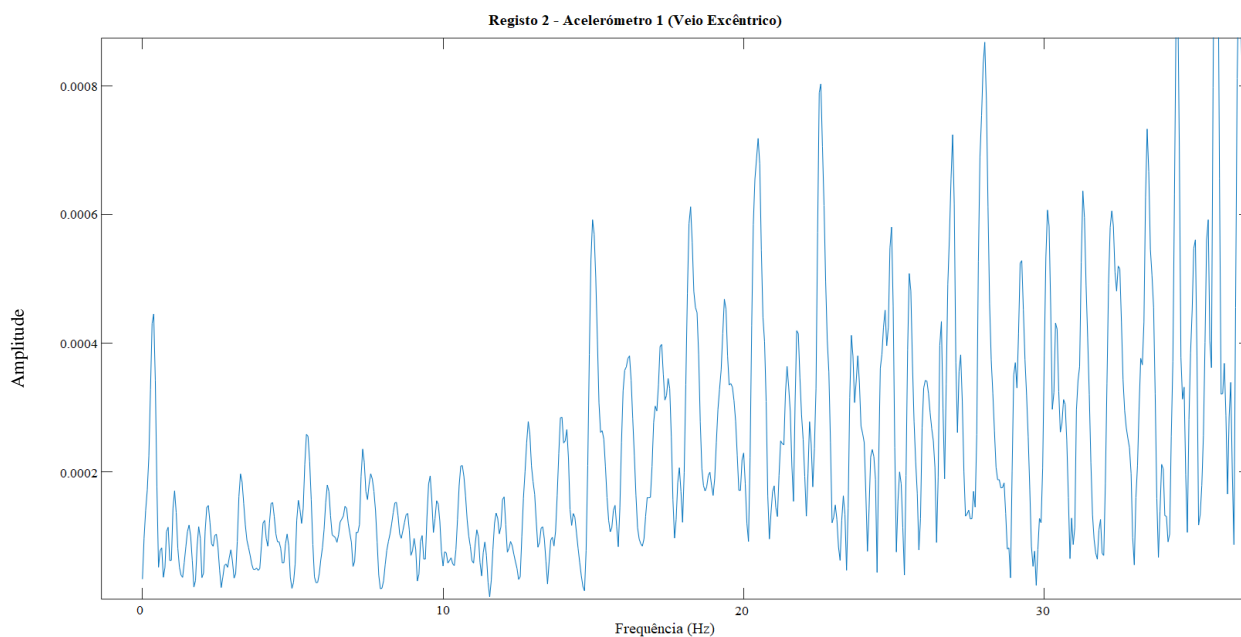


Figura 65 - Espectro de frequências do acelerômetro 1 no Registro 2 (Veio excêntrico)

Todas as conclusões apontadas na análise dos espectros obtidos assentam em hipóteses. De forma a aprofundar e clarificar a razoabilidade das mesmas seria necessário a obtenção de mais sinais, com melhor qualidade, se possível com acelerómetros melhor adaptados a medições de frequências mais baixas e aumentar o conhecimento interno do corpo da máquina, de forma a associar mais facilmente frequências obtidas a movimentações internas dos componentes.

De qualquer das formas, destaca-se algumas conclusões relevantes para o trabalho: a identificação de uma possível velocidade de funcionamento do volante de inércia e da polia da bomba de alimentação principal, a deteção de um possível fenómeno de cavitação e a deteção de folgas nos rolamentos de escorregamento da bomba.

O objetivo passaria agora por conseguir associar de forma mais segura as frequências observadas, ao funcionamento dos componentes para permitir a melhorar a sua caracterização mecânica.

4.2 Análise e Interpretação das Imagens Termográficas

Os dados obtidos permitem registar a correspondência entre a imagem termográfica obtida e a imagem real do equipamento (Figura 66), podendo assim constituir-se uma primeira situação de referência do objeto de estudo.

a) Corpo da Máquina a Vapor

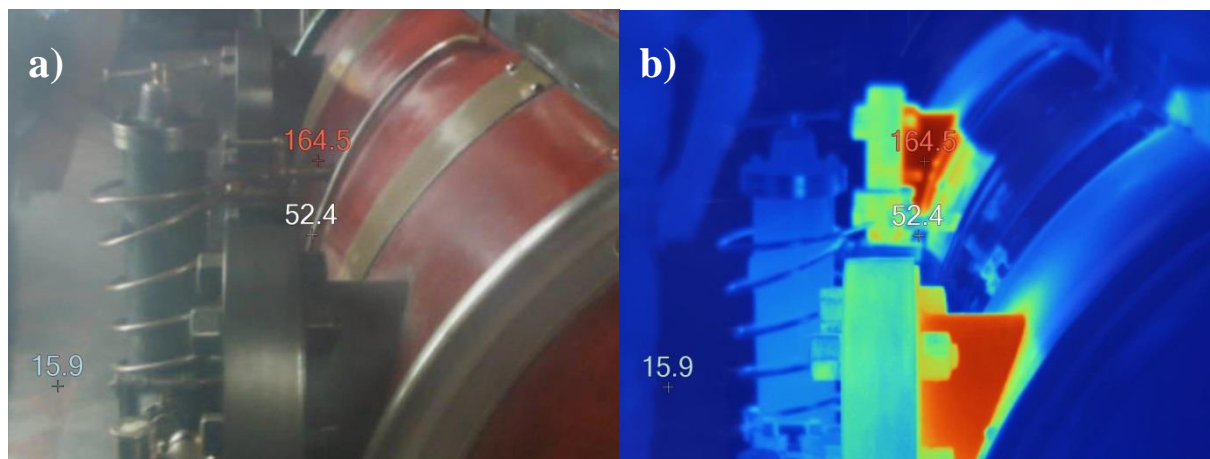


Figura 66 - a) Imagem real da máquina b) Imagem térmica da máquina

Quadro 17 – Registo de parâmetros de temperatura

Legenda	Emissividade	Temp. plano de fundo	Temperatura
Temp. Mínima	0,83	17,0	15,9
Ponto Central			52,4
Temp. Máxima			164,5

Ao observar as imagens da Figura 66 e o Quadro 17, é possível extrapolar algumas conclusões e comprovar alguns factos:

- O corpo da máquina apresenta uma temperatura reduzida (intervalo entre os 20°C e os 40°C) em comparação com outros componentes. Esta diferença vem comprovar o isolamento que se sabe existir no cilindro: lã ou feltro, seguindo-se um invólucro de madeira polida. Este isolamento serve não só o interesse da manutenção da temperatura interior do cilindro, mas também de evitar o aquecimento excessivo da área em torno da máquina, onde estariam presentes os operadores. Além disso assegura que se evitem acidentes por contacto com partes excessivamente quentes.
- A não existência de manchas no corpo da máquina indica que não existem evidências das espessuras não serem uniformes, da existência de fissuras ou de algum tipo de desgaste do isolante interior.
- Alguns componentes metálicos, pertencentes ao corpo da máquina, sem a cobertura de um isolante e em provável contacto próximo com o vapor evidenciam temperaturas elevadas (na ordem dos 140°C – 160°C).

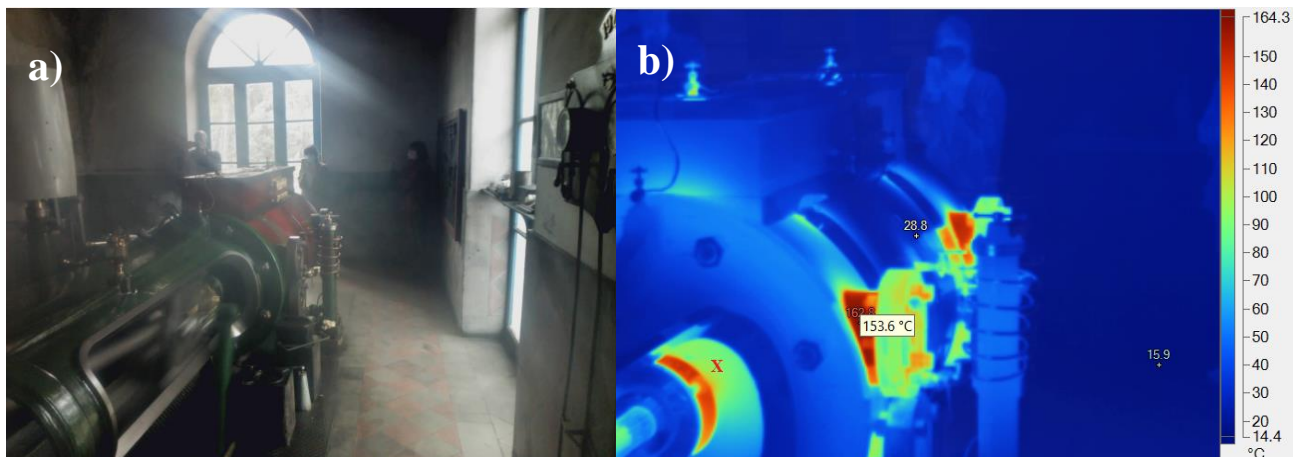


Figura 67 – a) Imagem real da máquina b) Pormenor das temperaturas de vários componentes

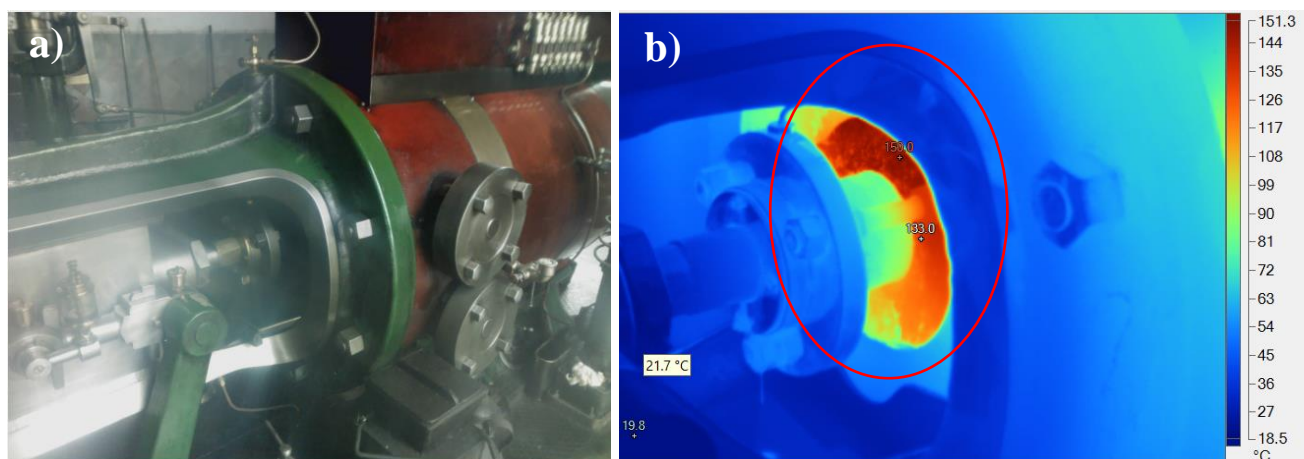


Figura 68 – a) Imagem real da zona do veio do pistão b) Imagem termográfica da zona do veio do pistão

O componente que se destaca pelas temperaturas mais elevadas que os restantes elementos presentes na figura é uma tampa de metal que possui um furo por onde passa o veio ligado ao pistão. Esta tampa tem um contacto próximo com o vapor a elevadas temperaturas e não apresenta nenhum tipo de isolamento, daí as temperaturas que se verificam nesta peça.

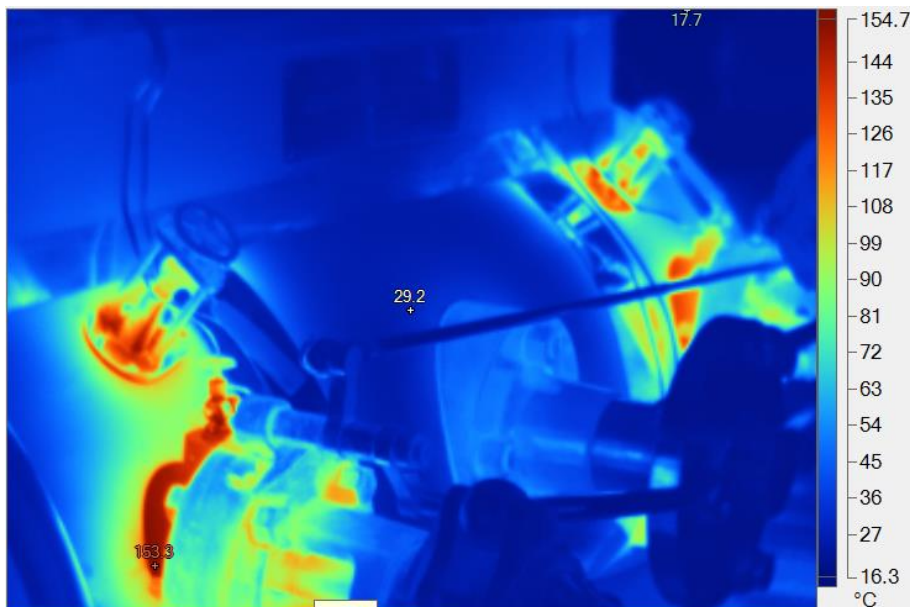
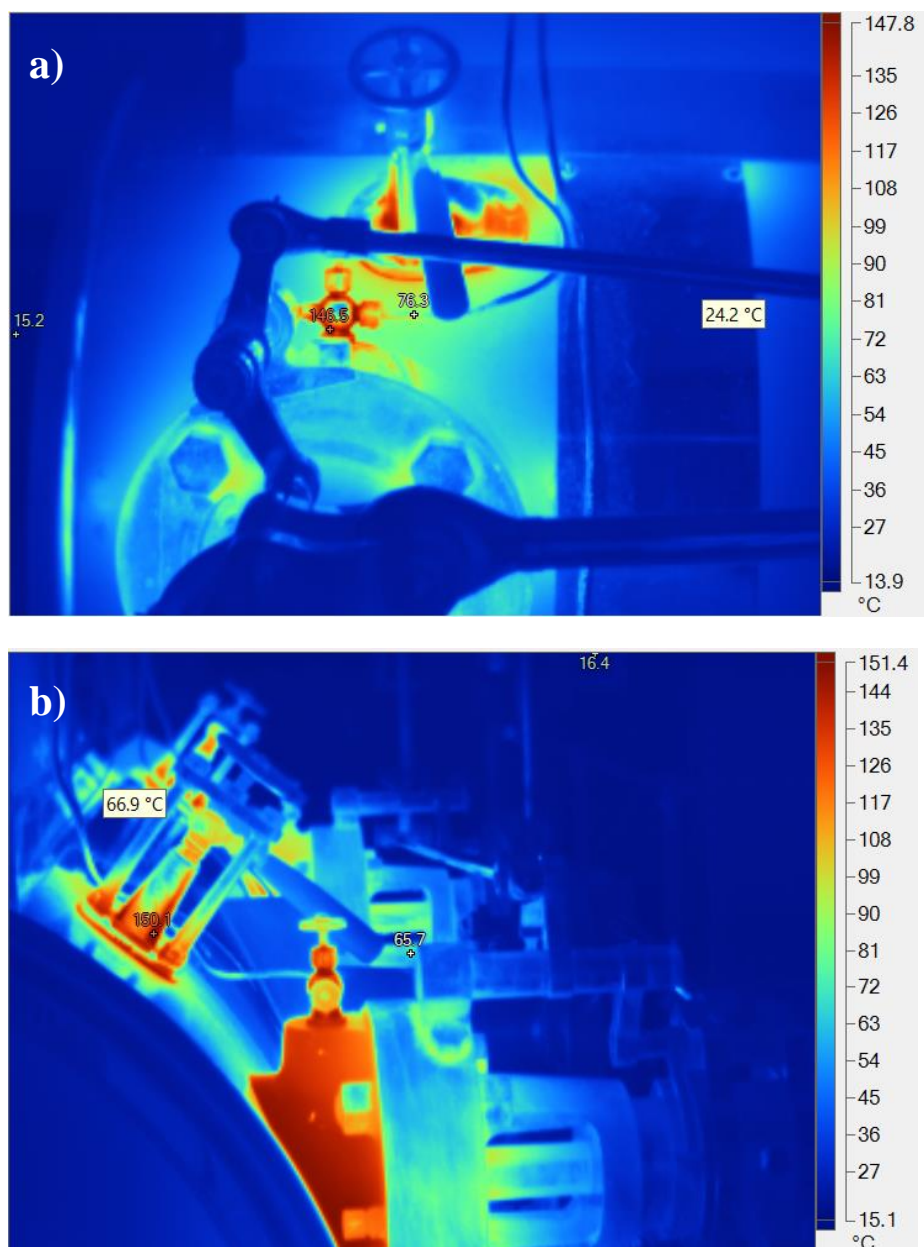


Figura 69 – Corpo da máquina (do lado do operador)

1. Mais uma vez identificam-se componentes metálicos exteriores ao cilindro que atingem temperaturas elevadas (inexistência de isolamento nesses componentes ou contacto mais próximo com o vapor);
2. Pormenor interessante das válvulas – parte em contacto com a máquina a temperaturas superiores a 100°C. No entanto na parte do componente em que vai existir contacto com o operador as temperaturas baixam drasticamente para a ordem dos 30°C. Sendo o elemento todo composto aparentemente pelo mesmo material, a dispersão de calor prende-se com duas hipótese: a presença da rosca integrante do sistema da válvula, capaz de dispersar as altas temperaturas, ou a possível presença de um isolamento capaz de reduzir a condução de calor num elemento aparentemente todo metálico. Importa aprofundar esta questão para uma maior compreensão não só deste elemento, mas também para um enquadramento do que já seria uma preocupação dos fabricantes em proteger a segurança dos operadores. Importa aprofundar esta questão, não só compreender, mas também identificar e catalogar os tipos de métodos utilizados.



**Figura 70 – Pormenor das temperaturas do sistema de válvulas a) perspectiva frontal
b) perspectiva lateral**

Legenda	Emissividade	Temp. plano de fundo	Temperatura
Temp. Mínima	0,83	17,0	16.4°C
Ponto Central			65.7°C
Temp. Máxima			150.1°C

Quadro 18 – Registo dos parâmetros de temeperatura

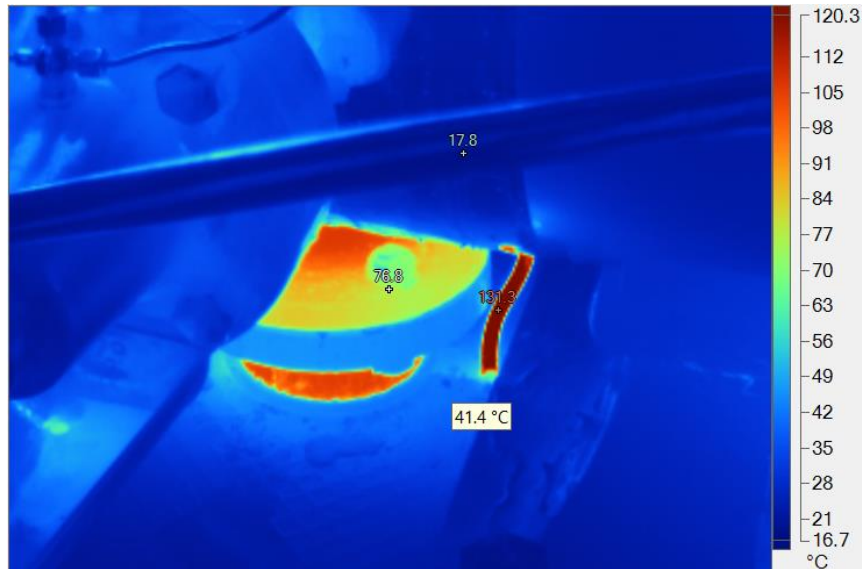


Figura 71 – Tubagem de Saída de Vapor - Vapor utilizado no avanço do pistão

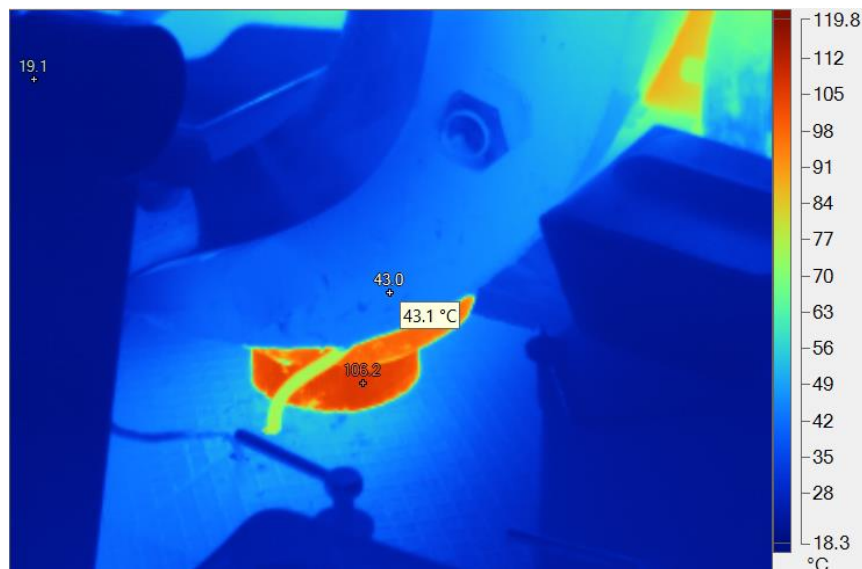


Figura 72 – Saída de Vapor - Vapor utilizado no retorno do pistão

Numa máquina a vapor (máquina térmica) a substância de trabalho, neste caso o vapor, transfere energia através da expansão no interior do cilindro. A temperatura da substância diminui e a energia perdida reaparece na forma de energia mecânica, acionando o sistema.

Este facto explica a diferença de temperatura entre as tubagens de saída do vapor e os componentes em contacto com o vapor aquando da sua entrada no cilindro, verificando-se temperaturas mais elevadas nos componentes que estão em contacto com o vapor proveniente da caldeira (a temperaturas mais elevadas).

Considerações sobre a Temperatura do Cilindro:

O envio de vapor para a máquina inicia-se quando a pressão do mesmo na caldeira atinge a pressão de 5 bar (observado no manómetro instalado na caldeira). Ao assumir que não ocorre uma relevante perda de pressão do vapor entre a saída da caldeira e a entrada no cilindro é possível prever a temperatura do vapor dentro do cilindro recorrendo a tabelas da termodinâmica.

A pressão de saturação é a pressão exercida pelo vapor quando este se encontra em equilíbrio termodinâmico com o líquido que lhe deu origem, isto é, a quantidade de líquido que evapora é a mesma que condensa. Esta pressão relaciona-se com a temperatura do líquido através da tabela cujo excerto se apresenta na Figura 73.

Temp. °C T	Sat. press. MPa P_{sat}	Specific volume m ³ /kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g	Sat. liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. vapor u_g	Sat. liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. vapor h_g	Sat. liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. vapor s_g
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663

Figura 73 - Excerto de tabela de termodinâmica com as propriedades da água

De forma a interpretar da melhor forma a tabela, é necessário converter a pressão de 5 bar em MPa, que é a unidade utilizada. Sabendo que 1 bar = 0,1 MPa então:

$$5 \text{ bar} = 0,5 \text{ MPa}$$

Apesar de este valor não surgir na tabela, é possível realizar uma extrapolação da temperatura utilizando a seguinte expressão:

$$y = y_1 + \left[\frac{(x - x_2)}{(x_2 - x_1)} (y_2 - y_1) \right]$$

Assim, substituindo as variáveis:

$$y = 150 + \left[\frac{(0,5 - 0,4758)}{(0,5431 - 0,4758)} (160 - 150) \right]$$

$$y = 153,6^\circ\text{C}$$

Pode-se então assumir o valor de 153,6 °C, como sendo o valor da temperatura do vapor dentro do cilindro. No entanto, dada a incerteza associada à pressão assumida, devido à possibilidade de existência de fugas ou de flutuações de pressão, considera-se mais correto assumir um intervalo de temperatura entre os 140°C e 160°C. Estes valores de temperatura estão em concordância com os valores observados em componentes que se sabe estarem em contacto com o vapor, como é o caso, por exº, da Figura 68.

b) Tubagens

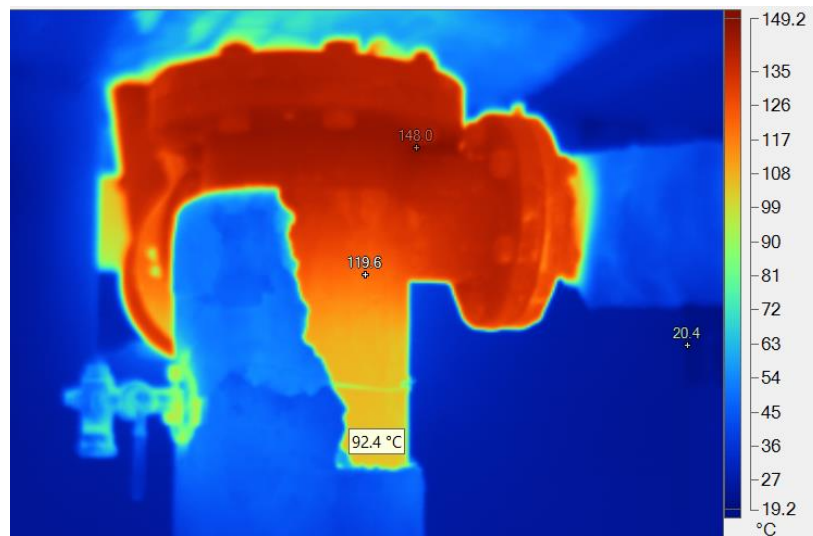


Figura 74 – Junção de tubagens

1. Clara existência de um material isolante que cobre os tubos para que não haja perda de calor, nem o aquecimento do ambiente envolvente;
2. Na Figura 74 nota-se um desgaste deste isolante, havendo uma parte em que a cobertura se partiu, deixando o tubo exposto;
3. Outro pormenor interessante é o facto de a junção de tubagens, bem como qualquer mudança de direção dos mesmos, não tem cobertura do isolante, justificada pela complexidade geométrica que dificulta o revestimento nestas situações e pela necessidade de um fácil acesso para manutenção das juntas;

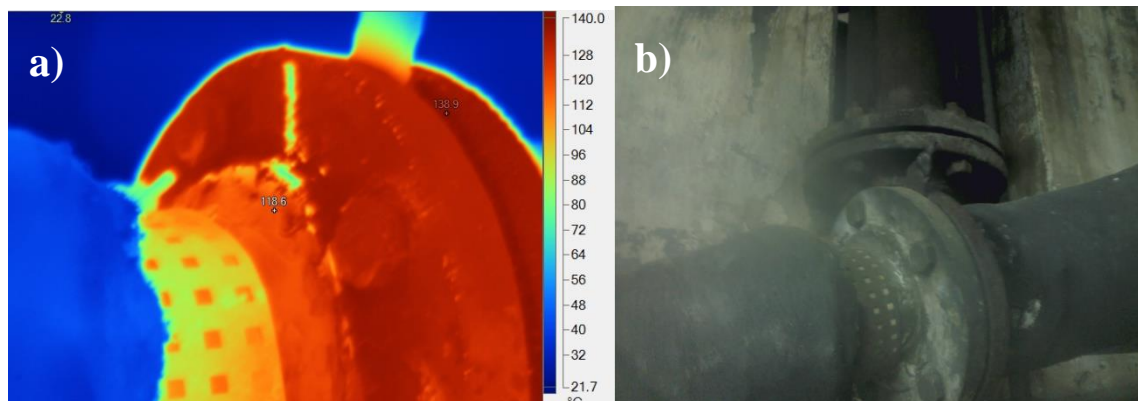


Figura 75 – Zona de união de tubagem a) Imagem termográfica b) Imagem real

Na Figura 75 pode-se detetar um padrão de cores que se encontra fora do corpo das tubagens. A presença desta mancha poderia indicar uma fuga de vapor que sofreria um rápido arrefecimento. No entanto, ao observar-se a imagem real imediatamente se deteta que esta mancha pertence a uma superfície polida das tubagens. Este é um bom exemplo de um dos problemas da termografia.

A câmara tem o parâmetro de emissividade uniforme para toda a imagem, logo uma zona que tenha sido lixada/polida fica com maior reflexão, aparecendo na imagem zonas localizadas com variação de temperatura abrupta. Um olhar mais desatento sobre os resultados poderia levar a um falso diagnóstico.

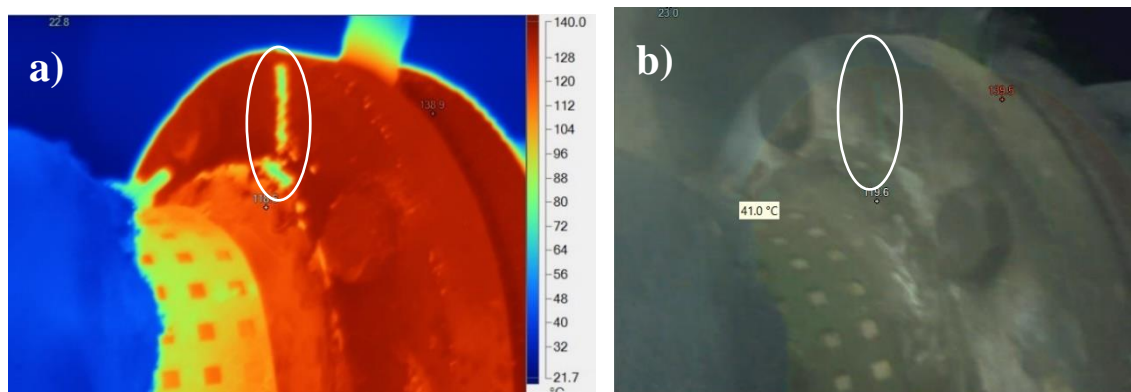


Figura 76 – Zona de abrasão localizada a) Imagem termográfica b) Imagem real

As marcas identificadas na Figura 76 correspondem a uma zona onde se observa uma abrasão localizada da peça. Este facto justifica a variação de temperaturas observada, dada a alteração sofrida pelo material.

Ao ampliar um pouco uma secção da tubagem da imagem anterior surgem alguns pormenores de zonas claramente mais frias que o global (Figura 77).

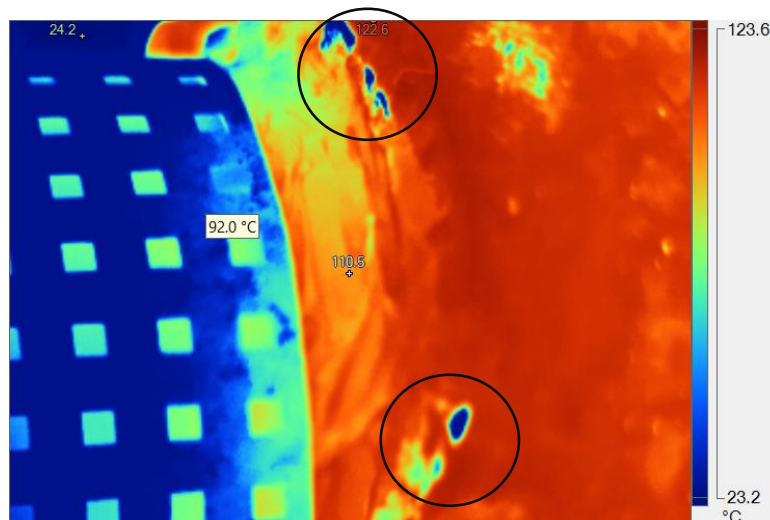


Figura 77 – Zona de união de tubagem com selante

Observando a imagem real repara-se que nestas zonas identificadas existem saliências (Figura 78).



Figura 78 – Zona de união de tubagem com selante – imagem real

Uma observação cautelosa destas zonas revela a presença de um selante de junta danificado, com uma fraca adesão à tubagem onde está empregue. Questionados sobre este facto os responsáveis da fábrica revelam que a presença do selante foi resultado de uma intervenção defeituosa que tinha como objetivo assegurar uma mínima manutenção dos objetos.

c) Caldeiras



Figura 79 - Imagem real da caldeira

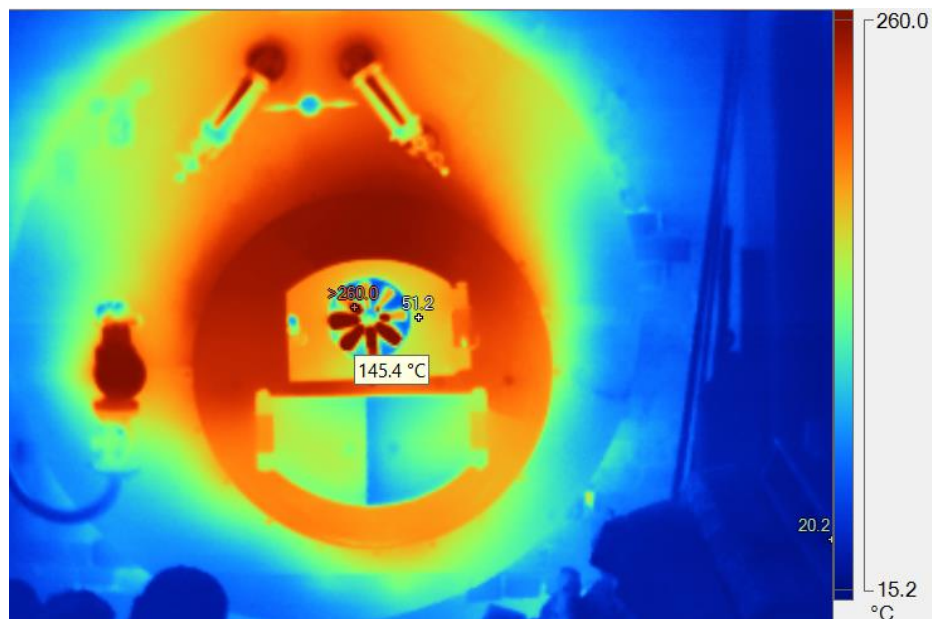


Figura 80 – Imagem termográfica da caldeira

A temperatura máxima detetada, superior a 260°C, proveniente da porta que permite ver para o interior da fornalha permite constatar as elevadas temperaturas produzidas para o aquecimento da água na caldeira. A medição de temperaturas realizadas através da colocação de um sensor no interior da fornalha permitiu concluir que as temperaturas perto das chamas no interior atingem níveis mais elevados do que os detetadas pela termografia, limitados pelo limite máximo de deteção da câmara e pela distância de medição.

Apesar de o calor que sai pela porta da fornalha corromper os valores de temperatura correspondentes ao próprio material da tampa da caldeira, permite ainda assim concluir o elevado aquecimento que este componente sofre exatamente numa zona próxima à porta da fornalha.

Os ciclos de aquecimento e arrefecimento que ocorram ao longos dos anos de funcionamento levaram ao surgimento de uma fratura, registada na Figura 81.



Figura 81 – Fratura na porta da Caldeira

Esta fissura, aparentemente fechada e indetetável quando a caldeira se encontra a frio, surge quando se começam a atingir as temperaturas necessárias à produção de vapor no interior da caldeira.

4.3 Análise e Interpretação do Registo de Temperatura

O sistema de aquisição de dados, constituído pelo sensor de temperatura e pela placa Arduino (descrito na secção 3.3) foi montado no local para registar e avaliar o comportamento da fornalha da caldeira.

Foi possível efetuar o registo dos valores de temperatura, durante o tempo em que durou o ensaio (aproximadamente 2 h), apresentando-se na Figura 82 um gráfico com o registo dos valores medidos.

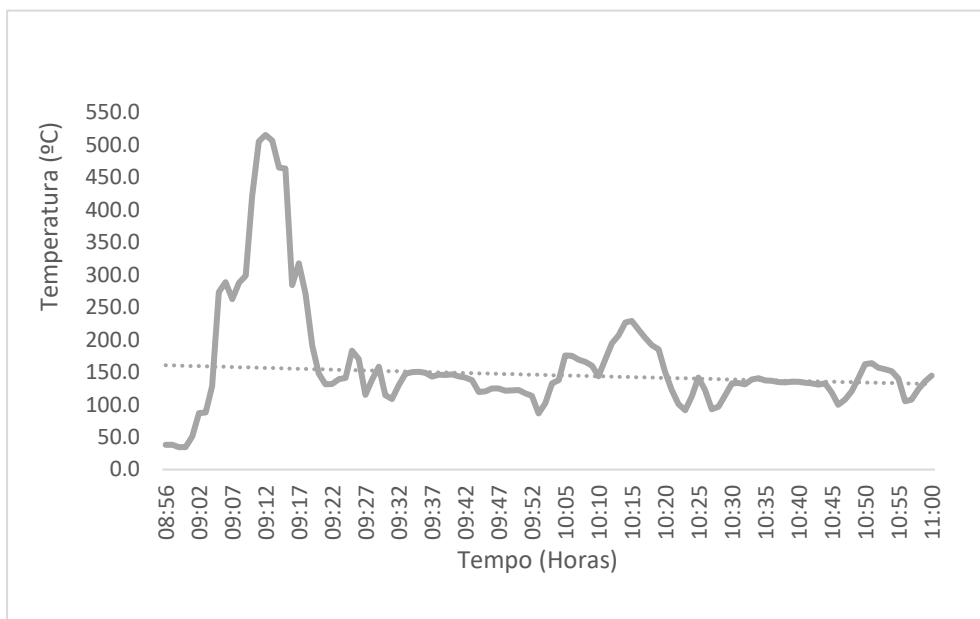


Figura 82 – Evolução da temperatura à entrada da fornalha

Apesar do sensor ter sido colocado à entrada da fornalha para evitar a proximidade da chama, os trabalhos de introdução de lenha pelo operador da caldeira terão alterado a sua posição momentaneamente, o que levou a que fosse registado um pico de temperatura acima dos 500°C.

As alterações constantes de descida e subida da temperatura justificam-se pela constante abertura e fecho da porta da fornalha para introdução de lenha. Períodos mais longos sem introdução de madeira levam a um aumento da temperatura.

A medição foi interrompida assim que o manómetro da caldeira atingiu os 5 bar (pressão em que as válvulas são abertas e o vapor é encaminhado para a máquina). Apesar das oscilações registadas ao longo do tempo, é possível a marcação de uma linha de tendência, ainda que influenciada pelo pico de 500°C registado, estabelecendo um intervalo de temperaturas que caracteriza o normal funcionamento da fornalha, entre os 130°C e os 160°C.

5. Conclusões

Subestimar a tecnologia existente na Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços é subestimar aquilo que noutra época era considerado o primor do avanço científico, criado e desenvolvido por engenheiros e cientistas que deixaram um legado na história e que contribuíram para o mundo que temos atualmente. A máquina a vapor representa aquilo que foram os primórdios da industrialização do mundo e em nada se assemelha, em termos de complexidade, ao que são hoje máquinas como as turbinas a vapor ou outras máquinas rotativas. E à medida que o conhecimento sobre estes objetos históricos vai desaparecendo no tempo, também o nosso interesse e entendimento sobre eles diminui. Com este trabalho pretendeu-se contribuir não só para manter vivo o legado existente, assegurando a continuidade de funcionamento das máquinas, mas também para suscitar o interesse no seu estudo tirando partido das novas técnicas e conhecimentos da engenharia atual.

Em qualquer das técnicas aplicadas à máquina a vapor e seus componentes ficou evidente que a interpretação dos resultados pode ser complexa e por vezes inconclusiva, tendo em conta a falta de referências ou qualidade dos dados.

Relativamente à termografia, a revisão bibliográfica permitiu constatar que esta técnica é muito utilizada na atualidade em ambientes industriais para controlar o estado de condição das máquinas, o seu funcionamento, e antecipar a existência de falhas que provocam aumentos de temperatura. Ao nível da sua aplicação em áreas de restauro e manutenção de património, encontraram-se alguns artigos que abordavam a aplicação desta técnica em estátuas, pinturas, e em edifícios históricos. Apesar de não ser uma bibliografia extensa, é evidente a tendência no sentido de normalizar a sua utilização para este efeito, ampliando o reconhecimento das suas vantagens e da informação que fornece.

Em relação à análise de vibrações, a bibliografia é vasta, especialmente ao nível da deteção de falhas em equipamentos rotativos. Isto deve-se principalmente à normalização da análise de vibrações como uma área comum na indústria, muito utilizada na manutenção e avaliação de condição. Ao nível da aplicação em património histórico, a bibliografia disponível é muito reduzida, havendo apenas alguns registos da utilização desta técnica limita-se praticamente à avaliação estrutural das edificações de forma a evitar danos, desabamentos ou outros acidentes. Não temos conhecimento que existam trabalhos que tenham recorrido a técnicas de controlo de condição para análise de elementos de património industrial.

Procurou-se também fazer uma caracterização dos principais elementos integrantes do sistema da máquina a vapor. Se em alguns componentes como o volante de inércia ou a caldeira a caracterização foi adequada, quer pela facilidade de acesso, pela informação disponibilizada e pela simplicidade do objeto, noutros como a máquina em si, a informação revelou-se pouco detalhada, especialmente no que se refere aos aspetos técnicos dos componentes internos da máquina, extremamente relevantes para o entendimento dos gráficos de vibrações. Apesar de existirem exemplos de máquinas consideradas semelhantes, a falta de conhecimento detalhado da máquina dificultou a elaboração de conclusões. O aprofundamento do conhecimento interno do corpo da máquina, constitui um tópico importante a estudar no futuro.

A dificuldade de interpretação dos dados de vibração neste estudo está relacionada com diversos fatores, nomeadamente:

- O ruído que se gera no sinal, influenciado por vários componentes em movimento e pela circulação de vapor;
- A flutuação de velocidade de funcionamento da máquina.
- A utilização de acelerómetros piezoelétricos menos adequados para a medição de sinais em muito baixa frequência, que dificultou a leitura do espectro nas zonas pretendidas.
- A rigidez da fixação dos acelerómetros

Este último ponto é de facto relevante neste trabalho na medida em que a fixação dos acelerómetros foi dificultada pelo facto de se estabelecer como prioridade a não danificação do património. Se numa situação normal o acelerómetro teria sido rigidamente ligado ao objeto em estudo, neste caso foi necessário recorrer a um sistema de fixação não permanente, que, não sendo ideal para efetuar medições, foi a única possibilidade de fixar os acelerómetros sem danificar a superfície do objeto de estudo.

A identificação de possíveis falhas fica dificultada, não só pela difícil interpretação do espectro de vibrações, mas também pela reduzida catalogação de falhas em máquinas semelhantes e em chumaceiras de escorregamento. Será importante a título de trabalho futuro aprofundar a pesquisa bibliográfica em relação a falhas neste tipo de equipamento.

No entanto, através da análise dos espectros obtidos, foi possível apontar algumas evidências relativas à frequência de funcionamento. O aparecimento de frequências semelhantes no veio excêntrico, no corpo da máquina e na chumaceira do volante de inércia permite não só estabelecer uma ligação dinâmica entre estes elementos, mas também relacionar estas frequências com a velocidade de funcionamento da máquina a vapor.

Apesar destas evidências, é relevante a realização de mais campanhas de medição, se possível com acelerómetros mais adequados, de forma a ampliar a análise e proporcionar-se uma melhor fundamentação

Os resultados relativos à bomba de alimentação principal levantaram três hipóteses. A primeira está relacionada efetivamente com a velocidade de funcionamento da bomba, cujos resultados práticos coincidiram com os cálculos teóricos que foram feitos, o que leva a uma maior confiança nos mesmos. A segunda hipótese levantada foi a possível existência de folgas excessivas num dos rolamentos de escorregamento da bomba, podendo evidenciar uma lubrificação deficiente. Finalmente a terceira hipótese reside na possível existência de cavitação na bomba. Esta hipótese é menos fundamentada pelos resultados, mas ainda assim, e tal como as outras, justifica um estudo mais aprofundado da bomba, não só em termos de obtenção de mais resultados, mas também do conhecimento interno do seu funcionamento e dos seus componentes.

A obtenção dos espectros de frequência dos elementos em funcionamento serve o propósito de catalogação de resultados, caracterizando uma situação de referência que serve para futuras comparações.

No que se refere à termografia, as medições na máquina, tubagens e caldeira mostraram-se bastante interessantes, especialmente ao nível da caracterização dos objetos. Factos como o isolamento do corpo da máquina face ao calor proveniente do vapor, a fraca condutividade de calor de elementos que implicavam a proximidade do operador contribuem bastante para o entendimento do sistema. Além de serem elementos relevantes para a caracterização, o registo das temperaturas dos componentes com a máquina em funcionamento pode, num futuro próximo, contribuir para a monitorização dos mesmos, servindo como registo de comparação que pode facilitar a identificação de zonas de sobreaquecimento que se venham a desenvolver.

Relativamente à avaliação da condição do objeto de estudo no que se refere ao controlo de temperatura da caldeira, existe um aspeto com interesse de desenvolvimento futuro que se relaciona com a colocação de sensores para a medição em contínuo da temperatura da fornalha da caldeira, permitindo estimar a temperatura da caldeira e monitorizá-la ao longo do tempo.

Atualmente a caldeira está sempre em funcionamento e existe um interesse em manter a fornalha a uma certa temperatura, evitando que a chama se extinga por forma a que não se verifiquem excessivas mudanças de temperatura que causam mais deterioração dos materiais. No entanto a única monitorização que existe é feita pelo fogueiro e no local, daí que haja um interesse da possibilidade de uma monitorização remota dos dados de temperatura.

O sistema de monitorização de temperatura da caldeira concebido para este projeto oferecia a possibilidade de consultar as temperaturas da fornalha *in situ*, quer através do computador ligado ao sensor, ou através de um IP criado na rede WiFi do espaço. Um investimento num equipamento de rede móvel e num espaço de internet para criar um site dedicado permitiria aceder aos dados de temperatura em qualquer parte do país, o que permitiria uma melhor gestão das deslocações à fábrica e um melhor controlo do consumo de lenha utilizada para alimentar a fornalha.

A relevância do projeto é de facto significativa, não só num contexto de engenharia, mas também num contexto de preservação patrimonial. A dificuldade de muitas vezes extrair conclusões está muito relacionada com a reduzida campanha de ensaios que foi possível realizar, parcialmente justificado pelo contexto de pandemia e confinamento em que o trabalho foi desenvolvido. No entanto, os resultados também evidenciam que é possível fazer uma caracterização técnica mais detalhada dos equipamentos e que o objetivo de implementar um sistema para controlo de condição que permita o planeamento de intervenções de manutenção para os vários elementos, não se encontra assim tão distante, constituindo este trabalho um ponto de partida para os futuros trabalhos a desenvolver.

5.1 Trabalhos futuros

Num contexto de trabalhos futuros existem várias propostas. Apesar dos dados recolhidos se apresentarem como relevantes e inovadores no âmbito do estudo do património industrial, o trabalho realizado pode ser considerado apenas uma introdução face ao potencial do projeto.

Ao nível da análise de vibrações as propostas de trabalho dividem-se em três partes: a primeira reside na obtenção de um maior conhecimento da máquina. Uma das maiores dificuldades na interpretação dos resultados prendeu-se com o conhecimento parcial dos componentes internos da máquina e o seu funcionamento. Uma análise mais aprofundada dos movimentos que ocorrem internamente poderá esclarecer alguns dos resultados. Além disso, a dificuldade de estabelecer condições ideais para as medições, afetou a coerência dos resultados. É importante obter um maior conjunto de dados, realizando a recolha em diferentes dias, variando as posições dos acelerómetros (posições estudadas previamente). Isto permitirá o alargamento do conhecimento do funcionamento e uma melhor interpretação de resultados. Este procedimento deve estender-se a todos os componentes do sistema: o corpo da máquina, chumaceiras, veios excêntricos, bombas de água. A necessidade de uma recolha mais alargada de dados ao nível das vibrações, com periodicidade regular (semanal, mensal), permitiria entender as variações das condições

de medição e os diversos estados de funcionamento, além de proporcionar a criação de uma base de dados para registo do padrão de funcionamento.

Em relação à termografia, um trabalho futuro poderá passar por um maior entendimento dos materiais que compõem o sistema, o que levará a uma maior compreensão das diferentes manchas de temperatura que surgem nos resultados. Uma melhor análise e uma interpretação mais detalhada dos resultados completará o estudo neste âmbito.

Em relação ao projeto do sistema que permite o controlo da temperatura da caldeira, existem vários *upgrades* que podem ser realizados. O sistema criado permite o acesso aos valores de temperatura desde que o utilizador se encontre ligado com um dispositivo à rede do espaço. No entanto, uma melhoria considerável seria permitir o acesso remoto aos dados recolhidos, ou seja, não haver necessidade de estar presente na fábrica. Além disto, seria de uma elevada relevância a criação de uma base de dados para os resultados obtidos, de forma a facilitar o acesso, a comparação e o estudo dos valores.

A FPMV é um ambiente rico em artefactos que merecem uma análise mais aprofundada, explorando perspetivas que não foram abordadas neste trabalho. Compete aos futuros intervenientes dar continuidade ao trabalho já iniciado e expandir o seu âmbito, a intervenção e os objetivos.

Apresenta-se no Quadro 19, uma síntese das propostas para trabalhos futuros, decorrentes do trabalho desenvolvido na FPVM no âmbito deste estudo.

Quadro 19 – Síntese de aspetos a considerar em trabalhos futuros

Áreas de intervenção	Ações futuras
Análise de vibrações	<p>Aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos e componentes internos da máquina a vapor.</p> <p>Recolha de dados adicionais, utilizando acelerómetros com características mais adequadas à gama de valores de frequências pesquisadas.</p> <p>Planeamento de campanhas de medição que permitam obter um maior e mais representativo conjunto de dados, por forma a caracterizar com mais detalhe o funcionamento da máquina e dos outros componentes do sistema (chumaceiras, veios excêntricos, bombas de água) e dessa forma, permitir o estabelecimento das condições ideais para a realização das medições de monitorização.</p> <p>A obtenção de um conjunto de dados mais alargado e representativo, permitiria também o estabelecimento de uma base de dados para registo do padrão “normal” de funcionamento dos equipamentos, essencial para facilitar a interpretação de resultados, elaboração de conclusões e deteção de situações anómalas.</p> <p>Aprofundar a pesquisa bibliográfica em relação a falhas neste tipo de equipamento (catalogação de falhas típicas e formas de diagnóstico).</p> <p>Aprofundar o estudo da bomba de alimentação principal, prevendo nomeadamente outras campanhas de medição, para comprovar a possibilidade de cavitação apontada neste estudo e fundamentar a necessidade de uma eventual intervenção.</p> <p>Análise mais aprofundada ao nível da constituição da bomba para a deteção eficaz de falhas, de forma a conhecer, por exemplo, a frequência de passagem das pás ou a possível existência de fugas entre o estator e o rotor.</p> <p>Estudo detalhado da bomba para confirmar a existência de folgas no rolamento de escorregamento.</p>
Termografia	<p>Estudo e melhor entendimento dos materiais que compõem o sistema, para melhorar a análise e interpretação das diferentes manchas de temperatura que se observam nos resultados obtidos.</p> <p>Repetir medições ao longo do tempo para identificação do desenvolvimento de anomalias, por comparação com os registos obtidos neste estudo.</p>
Controlo da temperatura da caldeira	<p>Implementação de um sistema de monitorização em contínuo. Desenvolver a possibilidade de acesso remoto aos dados recolhidos pelos sensores de temperatura colocados no local e a possibilidade de obter registos contínuos que permitam caracterizar/conhecer o funcionamento ‘normal’ do equipamento. A criação de uma base de dados com estes registos permitirá, nomeadamente por comparação, a identificação de situações anómalas e em tempo útil desencadear as necessárias intervenções.</p>

Referências bibliográficas

Arduino. [Online] <https://www.arduino.cc/>.

Alimkhan, Aisultan e Yebenbay, Yerdos. 2019. Vibration monitoring of motors. *Research*. março de 2019, doi:10.13140/RG.2.2.19428.42880.

Arias, Johann. 2017. Fábrica de Pólvora del Valle de Milhaços: Structural analysis of a steam power generating plant. *Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho*. 2017.

Arsheen Mir e R. Swarnalatha. 2018. Implementation of an industrial automation system model using an Arduino. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018, doi: 3(12):4131-4144.

Assis, Altair, Azeved, Chalelson Miranda e Santiago, Arnaldo José. 2013. *Uma História de Inovação Tecnológica no Espetro da Luz*. 2013. doi:10.13140/RG.2.2.27670.75840.

Bird, R. Byron, Stewart, Warren E. e Lightfoot, Edwin N. 2004. *Fenómenos de Transporte (2.ª edição)*. s.l. : LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2004.

Bocanegra, Andrès. 2017. *Fábrica da Pólvora de Vale de Milhaços: Assessment of na Industrial complex*. *Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho*. 2017.

Brady, S. 2002. *Introduction guide to vibration monitoring: measurements, analysis, and terminology*. s.l. : EUA: SKF Reliability Systems, may. 2002. 30p., 2002.

Brito, M. 2003. *Manual Pedagógico PRONACI Manutenção*;. 2003.

Brown, D.N. *Machine-Condition Monitoring using Vibration Analysis - A Case Study from a Nuclear Power-Plant (BO0209-11)*. s.l. : Bruel & Kjasr.

Brunetti, Franco. 2012. *Motores de Combustão Interna*. s.l. : Blucher, 2012.

Campione, Ivo, et al. 2020. 3D thermal imaging system with decoupled acquisition for industrial and cultural heritage applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). [Online] 2020. doi: 10.3390/app10030828.

Carlomagno, G.M. e Cardone, G. 2010. *Infrared thermography for convective heat transfer measurements. Experiments in Fluids*. 2010.

CEN. 2017. EN 13036 - Maintenance. Maintenance terminology. 2017.

Custódio, Jorge. 2012. A Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços Singularidade e inovação de um complexo fabril do património industrial português. *Pedra & Cal*, nº 52. 2012, p. 16.

Faria, Nuno. 2013. *Elaboração e implementação de um plano geral de manutenção preditiva, preventiva e curativa na Lipor – Serviço de intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Dissertação Mestrado.* FEUP, 2013.

Fernandes, Maria Francisca. 2015. *Desenvolvimento de um sistema de monitorização e análise de qualidade do ambiente interior de edifícios. Dissertação de Mestrado.* Universidade de Lisboa, 2015.

Filipe, Graça. 2017. *Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços (séculos XIX-XXI): importância da protecção legal do património industrial e potencialidades da musealização do Circuito da Pólvora Negra.* Porto : CITAR / Escola das Artes / Universidade Católica Portuguesa - Associação Portuguesa para o Património Industrial, 2017. pp. 422-431.

Jornalíssimo. www.jornalissimo.com. [Online] 2019. <https://www.jornalissimo.com/historia/1058-a-fabrica-de-polvora-de-vale-de-milhacos-da-nos-a-conhecer-mais-de-um-seculo-de-historia-industrial>.

Filipe, Graça, Sabino, Fátima e Verissimo, Fátima. 2012. *O Sistema Gerador de Energia (Caldeira a Vapor e Máquina a Vapor) do Circuito da Pólvora Negra da Antiga Fábrica de Pólvora de Vale de Milhaços (Corroios, Seixal). Caracterização Técnica e Funcional. Texto de apoio à programação de visitas e outras iniciativas de interpretação. Ecomuseu Municipal do Seixal.* 2012.

Girdhar, P. e Scheffer, C. 2004. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.* s.l. : Elsevier, 2004.

IAEA. 2003. *Guidance for Optimizing Nuclear Power Plant Maintenance Programmes. IAEA-TECDOC-1383.* s.l. : IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003.

IAEA. 2007. *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC -1551.* s.l. : IAEA (International Atomic Energy Agency), 2007.

Incropera, Frank P. e DeWitt, David P. 2003. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa (5.ª edição).* s.l. : LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

Johnson, Arne e ElBatanouny, Mohamed. 2019. *Vibrations and Museum Collections - The Effects of Vibrations from Human Traffic and Construction on Museum Collections.* s.l. : Papyrus, 2019.

Kreith, Frank e Bohn, Mark S. 2003. *Princípios de Transferência de Calor.* s.l. : Pioneira Thomson Learning, 2003.

- Lacey, S. J. 2010.** The Role of Vibration Monitoring in Predictive Maintenance. *SHAEFFLER*. [Online] 2010. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/technicalpaper_1/download_1/the_role_of_vibration_monitoring.pdf.
- Looney, Mark. 2014.** An Introduction to MEMS Vibration Monitoring. *Analog Dialogue* 48-06. June de 2014.
- Mais, J. 2002.** *Spectrum analysis: the key features of analyzing spectra*. . s.l. : EUA: SKF Reliability Systems, 2002.
- Marcorin, W.R. e Lima, C.R.L. 2003.** Análise dos Custos de Manutenção e de Não manutenção de Equipamentos Produtivos. <https://docplayer.com.br/4745864-Analise-dos-custos-de-manutencao-e-de-nao-manutencao-de-equipamentos-produtivos.html>. [Online] 2003.
- Miljković, Dubravko. 2015.** Brief Review of Vibration Based Machine Condition Monitoring. *CrSNDT Journal*. 5. 14-23. 2015.
- Mitchell, John S. 2007.** From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance - Seventy Years of Continuous Progress. *www.sandv.com*. [Online] January de 2007. <http://www.sandv.com/downloads/0701mitc.pdf>.
- Mónica, Paulo e Mónica, Diogo. 2011.** *Momento e oportunidade: Uma nota na história da Transformada Rápida de Fourier*. s.l. : Suplemento do Boletim da SPM 65, Outubro 2011, pp. 59–61, 2011.
- Morais, Bruno. 2016.** “Análise de vibrações a grupos de eletrobombas de uma estação elevatória”. *Dissertação Mestrado*. FCT-UNL, 2016.
- Morenghi, Luiz. 2005.** Proposta de um sistema integrado de monitoramento para manutenção. *Dissertação de mestrado*. Universidade de São Paulo : s.n., 2005.
- Morgado, Teresa. 2019.** *Metodologias da filosofia LEAN e os requisitos da norma EN ISO/IEC 17025:2017*. 2019.
- Moshage, Ralph, et al. 1993.** *Vibration Monitoring for Predictive Maintenance in Central Energy Plants. USACERL Technical Report FE-93/25. Advanced Operations and Maintenance Technologies for Central Heating Plants*. s.l. : US Army Corps of Engineers, 1993.
- Presidência do Conselho de Ministros. 2012.** Gabinete do Secretário de Estado da Cultura. Diário da República, 2ª série - nº 248. Portaria n.º 740-BG/2012. . 24 de dezembro de 2012.

- Rodrigues, Edmundo. 2020.** Processos de Transmissão de Calor. [Online] 2020. https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf.
- Roque, António, Silva, Tiago e Calado, J. M. F. 2007.** *Detecção de defeitos em rolamentos – Uma aproximação didáctica*. s.l. : Engenharias'07. IEEE Education Society., 2007.
- Sabino, Fátima. 2007.** Uma máquina a vapor centenária, em Vale de Milhaços. *In Ecomuseu Informação :boletim trimestral do Ecomuseu Municipal do Seixal*. ISSN 0873-6197. N.º. 45. Out/Nov/Dez de 2007, pp. 11-13.
- Santos, Gonçalo. 2020..** *Modelação geométrica como apoio à conservação de património industrial*. Dissertação de Mestrado. NOVA FCT, 2020.
- Sauerwein, Ricardo Andreas. 2012.** Objeto de Aprendizagem: Máquinas Térmicas. *Caderno Brasileiro do ensino de Física*. 2012, <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp2p812> .
- Scheffer, Cornelius e Girdhar, Paresh. 2004.** *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. eBook ISBN: 9780080480220. s.l. : Newnes, 2004.
- Sequeira, Cláudia. 2012.** *A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica. s.l. : Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- Shimosaka, Matheus Yoo. 2014.** *Estudo dinâmico comparativo entre mecanismos biela-manivela e o garfo escocês*. s.l. : Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Académico de Mecânica., 2014.
- Shreve. 1995.** *Signal processing for effective vibration analysis*. s.l. : IRD Mechanalysis, Inc, Columbus, Ohio, 1995.
- Shreve, Dennis H. 2003.** *Integrated Condition Monitoring Technologies*. s.l. : IRD LLC, 2003.
- SKF. 2000.** *SKF RELIABILITY SYSTEMS. Vibration diagnostic guide*. EUA: SKF Reliability Systems. 2000.
- Sousa, Luís Filipe Rodrigues de. 2010.** *Aplicação da Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. s.l. : Universidade de Aveiro, 2010.
- Sung-Min Kim, Yosoon Choi e Jangwon Suh. 2020.** Applications of the Open-Source Hardware Arduino Platform in the Mining Industry: A Review. *Applied Sciences*. 2020. doi:10.3390/app10145018

VeeruSubbuAmi. 2020. “*S1 A5 Interfacing MAX6675 with ESP8266 and display Temperature data on the web server*” . 2020.

Wowk, Victor. 2020. A brief tutorial on machine vibration. *Machine Dynamics, Inc.*
[Online] 19 de 11 de 2020.
https://www.machinedyn.com/docs/machine_vibration_tutorial.pdf.

ANEXO 1

Plataforma Arduino

Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem e desenvolvimento baseado em *hardware* e *software*, criada no *Ivrea Interaction Design Institute*, que se caracteriza pela simplicidade (Programação, montagem e utilização), pelo baixo custo, pela possibilidade de *cross-platform* e por ser *open-source* (código aberto?) Tem um preço relativamente baixo em comparação com outros produtos concorrentes e suficientemente versátil para correr em Windows, Linux ou Macintosh OSX. Desde o início do Arduino Project, em 2005, estima-se que mais de um milhão de placas Arduino e as suas variantes tenham sido vendidas.

A placa de Arduino é constituída por um microprocessador Atmel AVR, um oscilador (relógio que envia pulsos de tempo numa frequência especificada para garantir uma operação na velocidade certa), um regulador de 5 volts, porta analógicas de entrada, saída, comunicação e alimentação. O envio das instruções para a placa necessárias para o procedimento é feito através de uma linguagem de programação Arduino, baseada em “wiring” (derivado da linguagem C++), e o software Arduino IDE, o qual permite a edição de código, programação do microcontrolador e visualização de dados. (Fernandes, 2015).




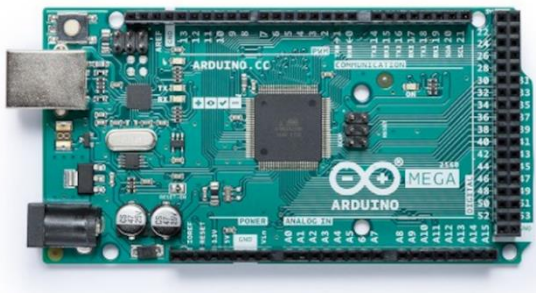
Microprocessador Atmel
AVR

Esta plataforma é capaz de interagir com diversos dispositivos externos, tais como sensores, motores ou computadores. Quanto à alimentação da placa esta pode ser feita através de USB ou por fonte de alimentação periférica. Existem dois locais de conexão para a fonte de alimentação periférica: o *jack*, para ligação de transformadores AC/DC, e os pinos de entrada (Vin) e terra (GND) para ligação de uma bateria. O Arduino é capaz de fornecer energia a partir dos seus pinos a uma tensão máxima de 5V ou 3,3V, e a uma corrente máxima de 50mA no pino de 3,3V e de 40mA nos pinos de I/O e de 5V.

Existem complementos adicionais para a placa de arduino, designadas por *shields*, que são placas de circuito que contêm outros dispositivos (recetores GPS, módulos de *Ethernet* ou *wifi*, entre outros) e permitem acrescentar funcionalidades à placa.

Existem diversas versões de Arduino disponíveis no mercado. Apresentam-se, no Quadro que se segue, as principais características dos modelos mais utilizados.

Quadro– Principais características das placas de arduino mais utilizadas (Fonte: www.arduino.cc)

<p style="text-align: center;">Arduino Uno</p> <p>Microprocessador ATmega328 (velocidade 16MHz). 14 entradas e saídas digitais. 6 entradas analógicas. 32Kb de memória para armazenamento. 2Kb memória para execução de aplicativos. Alimentada com fonte externa (entre 7V e 12V). Principal versão comercializada para aplicações comuns e simples.</p>	
<p style="text-align: center;">Arduino Mega</p> <p>Microcontrolador ATmega2560 com velocidade 16MHz. 54 entradas e saídas digitais. 16 entradas analógicas. 256Kb de memória para armazenamento. 8Kb de memória para execução dos aplicativos. Alimentada com fonte externa (entre 7V e 12V). Quantidade elevada de entrada e saídas. Recomendado para utilização em projetos de robôs e impressoras 3D.</p>	

O Arduino pode ser programado com recurso a *software* de código aberto conhecido como Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Esta plataforma permite escrever programas baseados na linguagem *Wiring*, distinguindo-se no facto de o Arduino IDE ser uma linguagem própria de programação de microcontroladores.

A programação em Arduino IDE está estruturada em 3 componentes principais:

- Funções auxiliares e variáveis globais;
- Função “*setup*” – Esta função é executada apenas uma vez e é onde se encontram todas as instruções iniciais e especificações do programa (preparação);
- Função “*loop*” – Onde se encontram as instruções por ordem sequencial, que se repetem ciclicamente (execução);

Apresenta-se na Figura que se segue, uma ilustração do menu de programação em Arduino IDE.



Figura – Menu de programação em Arduino IDE

Legenda:

Verificar - é utilizado para confirmar se o código está correto antes de se efetuar o upload para a placa.

Envio - faz o upload do código para a placa Arduino.

Novo - permite criar um sketch novo onde se pode iniciar outro código.

Monitor Série - permite mostrar os dados devolvidos pelo Arduino e ainda o envio de dados para a placa, desde que o código esteja pronto para que isto aconteça.

ANEXO 2

Código completo para aquisição de dados e criação de página Web

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include "max6675.h"
float t, tF;
/*Put your SSID & Password*/
const char* ssid = "inserir nome da rede"; // Enter SSID here
const char* password = "password"; //Enter Password here
ESP8266WebServer server(80);
int thermoDO = D6; // SO of MAX6675 module to D6
int thermoCS = D8; // CS of MAX6675 module to D8
int thermoCLK = D5; // SCK of MAX6675 module to D5
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(100);
  Serial.println("A Conectar ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi conectado..!");
  Serial.print("IP: "); Serial.println(WiFi.localIP());
  server.on("/", handle_OnConnect);
  server.onNotFound(handle_NotFound);
  server.begin();
  Serial.println("HTTP server started");
}

void loop() {
  server.handleClient();
}

void handle_OnConnect() {
  t = thermocouple.readCelsius();
  Serial.print("Graus Celsius = ");
  Serial.println(t);
  Serial.println();
  server.send(200, "text/html", SendHTML(t));
}

void handle_NotFound(){
  server.send(404, "text/plain", "Not found");
}

String SendHTML(float t){
  String ptr = "<!DOCTYPE html>";
  ptr += "<html>";
  ptr += "<head>";
  ptr += "<title>Controlo Temperatura Caldeira</title>";
```

```

ptr += "<meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0'>";
ptr += "<link href='https://fonts.googleapis.com/css?family=Open+Sans:300,400,600' rel='stylesheet'>";
ptr += "<style>";
ptr += "html { font-family: 'Open Sans', sans-serif; display: block; margin: 0px auto; text-align: center; color: #444444; }";
ptr += "body { margin: 0px; } ";
ptr += "h1 { margin: 50px auto 30px; } ";
ptr += ".side-by-side { display: table-cell; vertical-align: middle; position: relative; }";
ptr += ".text { font-weight: 600; font-size: 19px; width: 200px; }";
ptr += ".reading { font-weight: 300; font-size: 50px; padding-right: 25px; }";
ptr += ".t .reading { color: #F29C1F; }";
ptr += ".tF .reading { color: #3B97D3; }";
ptr += ".superscript { font-size: 17px; font-weight: 600; position: absolute; top: 10px; }";
ptr += ".data { padding: 10px; }";
ptr += ".container { display: table; margin: 0 auto; }";
ptr += ".icon { width: 65px; }";
ptr += "</style>";
ptr += "<script>\n";
ptr += "setInterval(loadDoc,1000);\n";
ptr += "function loadDoc() {\n";
ptr += "var xhttp = new XMLHttpRequest();\n";
ptr += "xhttp.onreadystatechange = function() {\n";
ptr += "if (this.readyState == 4 && this.status == 200) {\n";
ptr += "document.body.innerHTML =this.responseText}\n";
ptr += "};\n";
ptr += "xhttp.open(\"GET\", \"\", true);\n";
ptr += "xhttp.send();\n";
ptr += "}\n";
ptr += "</script>\n";
ptr += "</head>";
ptr += "<body>";
ptr += "<h1>Controlo Temperatura Caldeira</h1>";
ptr += "<div class='container'>";
ptr += "<div class='data t'>";
ptr += "<div class='side-by-side icon'>";
ptr += "<svg enable-background='new 0 0 19.438 54.003' height=54.003px id=Layer_1 version=1.1 viewbox='0 0 19.438 54.003' width=19.438px x=0px xml:space=preserve xmlns=http://www.w3.org/2000/svg xmlns:xlink=http://www.w3.org/1999/xlink y=0px><g><path d='M11.976,8.82v-2h4.084V6.063C16.06,2.715,13.345,0,9.996,0H9.313C5.965,0,3.252,2.715,3.252,6.063v30.982";
ptr += "C1.261,38.825,0,41.403,0,44.286c0,5.367,4.351,9.718,9.719,9.718c5.368,0,9.719-4.351,9.719-9.718";
ptr += "c0-2.943-1.312-5.574-3.378-7.355V18.436h-3.914v-2h3.914v-2.808h-4.084v-2h4.084V8.82H11.976z M15.302,44.833";
ptr += "c0,3.083-2.5,5.583-5.583,5.583s-5.583-2.5-5.583-5.583c0-2.279,1.368-4.236,3.326-5.104V24.257C7.462,23.01,8.472,22,9.719,22";
ptr += "s2.257,1.01,2.257,2.257V39.73C13.934,40.597,15.302,42.554,15.302,44.833z' fill=#F29C21 /></g></svg>";
ptr += "</div>";
ptr += "<div class='side-by-side text'>Temperatura °C</div>";
ptr += "<div class='side-by-side reading'>";
ptr += (int)t;
ptr += "<span class='superscript'>&deg;C</span></div>";
ptr += "</div>";

ptr += "</body>";
ptr += "</html>";
return ptr;
}

```